



Università degli Studi di Cagliari

DOTTORATO DI RICERCA

Scienze e Tecnologie della Terra e dell'Ambiente

Ciclo XXXII

TITOLO TESI

Monitoraggio del degrado e conservazione del Patrimonio monumentale della Regione Sardegna attraverso caratterizzazione geochimica, petrofisica e micro-fotogrammetrica di superfici lapidee

Settore scientifico disciplinare di afferenza

GEO/09

Presentata da: Fabio Sitzia

Coordinatore Dottorato: Prof. Aldo Muntoni

Tutor: Prof. Gabriele Cruciani

Co-Tutor: Prof. Stefano Columbu

Esame finale anno accademico 2018 - 2019
Tesi discussa nella sessione d'esame Febbraio 2020

La presente tesi è stata prodotta durante la frequenza del corso di dottorato in Scienze e Tecnologie della Terra e dell'Ambiente dell'Università degli Studi di Cagliari, XXXII ciclo, con il supporto di una borsa di studio finanziata con le risorse del P.O.R. Sardegna F.S.E. 2014-2020 - Asse III "Istruzione e Formazione" - Obiettivo Tematico 10, Priorità d'investimento 10ii), Obiettivo Specifico 10.5, Azione dell'accordo di Partenariato 10.5.12



L'arte ti somiglia
E' parte di te
Vive accanto a te
E' il tuo patrimonio



Capitolo 1: Introduzione 1

Capitolo 2: Contesti geografico, storico ed architettonico dei siti archeologici 11

- 2.1 Le Piccole Terme ed il Teatro di Nora (Pula, Sardegna, Italia) 11
- 2.2 La Basilica di San Saturnino (Cagliari, Sardegna, Italia) 16
- 2.3 Il lastricato del *Cardo* e le Terme II (Grandi Terme) di Tharros (Cabras, Sardegna, Italia) 19
- 2.4 Il Forum Traiani (Fordongianus, Sardegna, Italia) 22

Capitolo 3: Inquadramento geologico e materiali costruttivi dei siti archeologici 25

- 3.1 Le Piccole Terme ed il Teatro di Nora 25
- 3.2 La Basilica di San Saturnino 28
- 3.3 Il lastricato del *Cardo* e le Terme II (Grandi Terme) di Tharros 31
- 3.4 Il Forum Traiani 33

Capitolo 4: Contesto climatico delle aree dei siti archeologici 35

- 4.1 Il clima dell'area Mediterranea 35
- 4.2 Il clima in Sardegna e nelle aree dei siti archeologici 37
- 4.3 I parametri ambientali: temperatura, umidità, pioggia, vento, eliofania e radiazione solare 39

Capitolo 5: Il campionamento dei materiali litoidi (pietre e malte) 45

- 5.1 Tipologia e metodi di campionamento 45
- 5.2 Le Piccole Terme ed il Monte Su Casteddu 46
- 5.3 La Basilica di San Saturnino 49
- 5.4 Il lastricato del *Cardo* e le Terme II 53
- 5.5 Il Forum Traiani 57

Capitolo 6: Materiali e metodi analitici 61

- 6.1 Caratterizzazione fisico-meccanica ed analisi granulometriche (PSD, iPSD) 61
- 6.2 Caratterizzazione petrografica 64
- 6.3 Analisi geochimiche 64
 - 6.3.1 Diffrazione a Raggi X su polveri (XPRD) e micro-diffrazione (μ -XRD) 64
 - 6.3.2 Analisi dei pigmenti parietali con tecniche μ -Raman e μ -FT-IR 64
 - 6.3.3 Analisi termo-gravimetriche e termico-differenziali (TGA-DSC) 65
 - 6.3.4 Osservazioni in microscopia elettronica e microsonda (SEM-EDS) 65
 - 6.3.5 Analisi isotopiche sui marmi 65

6.4 Rilievo fotogrammetrico e cartografie di degrado 67

6.5 Test di degrado accelerati “aging test” (AAT) 69

Capitolo 7: Le Piccole Terme ed il Teatro di Nora: risultati e discussioni 70

7.1 Caratteristiche petrografiche (OM) 70

7.1.1 Le malte delle Piccole Terme 70

7.1.2 Le vulcaniti di Monte Su Casteddu 77

7.3 Proprietà fisico-meccaniche delle malte 79

7.4 Caratteristiche granulometriche dell’aggregato mediante analisi d’immagine (iPSD) 82

7.5 Diffrazione a Raggi X (XPRD) sulle malte 86

7.6 Analisi termo-gravimetrica (TGA) sulla frazione legante 91

Capitolo 8: Basilica di San Saturnino: risultati e discussioni 95

8.1 Caratteristiche petrografiche (OM) 95

8.1.1 Pietra Cantone e pietra Forte 95

8.1.2 Vulcaniti 98

8.1.3 Marmi 100

8.1.4 Malte 104

8.2 Proprietà fisico-meccaniche 110

8.2.1 Pietra Cantone, pietra Forte e vulcanite 110

8.2.2 Malte 115

8.3 Caratteristiche granulometriche dell’aggregato mediante setaccio (PSD) 120

8.4 Diffrazione a Raggi X sulle malte (XPRD) 126

8.5 Analisi termo-gravimetrica (TGA) e termico-differenziale (DSC) sulla frazione legante 130

8.6 Analisi in microscopia elettronica (SEM-EDS) 134

8.6.1 Rocce (Pietra Cantone, pietra Forte) 134

8.6.2 Malte 136

8.7 Analisi isotopiche sui marmi "bianchi" e "grigi" 140

Capitolo 9: Lastricato del *Cardo* e le Terme II di Tharros: risultati e discussioni 143

9.1 Caratteristiche petrografiche (OM) 143

9.1.1 Rocce (arenarie, vulcaniti) 143

9.1.2 Malte 147

9.2 Proprietà fisico-meccaniche delle rocce 152

9.3 Caratteristiche granulometriche dell’aggregato (PSD, iPSD) 157

9.4 Diffrazione a Raggi X sulle malte (XPRD) 163

9.5 Analisi termo-gravimetrica (TGA) sulla frazione legante 165

9.6 Analisi in microscopia elettronica (SEM-EDS) sulle malte 168

Capitolo 10: Le terme del Forum Traiani: risultati e discussioni 171

- 10.1 Caratteristiche petrografiche (OM) 171
 - 10.1.1 Rocce (ignimbriti) 171
 - 10.1.2 Malte 175
- 10.2 Proprietà fisico-meccaniche delle rocce 180
- 10.3 Caratteristiche granulometriche dell'aggregato mediante setaccio (PSD) 185
- 10.4 Diffrazione a Raggi X sulle malte (XPRD) 193
- 10.5 Analisi termo-gravimetrica (TGA) sulla frazione legante 196
- 10.6 Analisi in microscopia elettronica (SEM-EDS) sulle rocce 199
- 10.7 Caratterizzazione composizionale dei pigmenti degli affreschi parietali 204
- 10.8 Analisi composizionale delle serie stratigrafiche delle malte parietali: significato archeometrico 207

Capitolo 11: Le alterazioni e le degradazioni dei materiali lapidei *in situ* 210

- 11.1 Introduzione 210
- 11.2 Rocce sedimentarie: calcari della serie carbonatica di Cagliari ed arenarie 214
- 11.3 Rocce vulcaniche: rioliti, daciti, riolaciti, basalti ed andesiti 220
- 11.4 Rocce metamorfiche: marmi Apuano-Lunensi 224

Capitolo 12: Il trattamento del dato meteorologico ed il settaggio delle camere climatiche 226

- 12.1 Trattamento dei dati climatici 226
- 12.2 Settaggio generale della camera climatica FITOCLIMA 229
 - 12.2.1 Settaggio dei parametri ambientali: temperatura, umidità e contenuto di anidride carbonica 229
- 12.3 Settaggio della camera climatica solare SOLARBOX 233

Capitolo 13: I test accelerati d'invecchiamento (*aging test*) 235

- 13.1 Modalità della prova e preparazione dei provini per la camera FITOCLIMA 235
- 13.2 Modalità della prova e preparazione dei provini per la camera SOLARBOX 241

Capitolo 14: Le alterazioni e le degradazioni dei materiali lapidei tramite *aging test*: risultati e discussioni 242

- 14.1 Variazioni morfologiche di superficie 242
- 14.2 Confronto dei dati pre e post *aging test* 246
 - 14.2.1 Proprietà fisiche 246
 - 14.2.2 Caratteristiche meccaniche 258
 - 14.2.3 Dati mineralogici 263
 - 14.2.4 Caratteristiche colorimetriche 266

Conclusioni: 269

- 15.1 Le Piccole Terme ed il Teatro di Nora (Pula, Sardegna, Italia) 269

15.2 La Basilica di San Saturnino (Cagliari, Sardegna, Italia)	270
15.3 Il lastricato del <i>Cardo</i> e le Terme II (Grandi Terme) di Tharros (Cabras, Sardegna, Italia)	271
15.4 Il Forum Traiani (Fordongianus, Sardegna, Italia)	272
15.5 Confronto fra risultati	272
15.6 Considerazioni conclusive generali	273

ABSTRACT

Cultural Heritage of Sardinia (Italy) consists of a large number of historical monuments belonging to different cultures (e.g. Nuragic, Roman, Phoenician-Punic, Romanesque, Aragonese), from 1800 BC to 1700 AD. Some of these buildings, nowadays in a poor state of conservation, are subject to management and monitoring plans.

In this research, four representative archaeological sites from Roman to Romanesque cultures are the topic of an in-depth study.

The project focuses on ancient mortars, stones and paintings.

An integrated and multi-scale approach proposed in this project, combines classical physical-mechanical, petrographic and geochemical investigations (archaeometry) with accelerated aging tests (AAT).

Optical mineralogy observations (OM) on stones permit the rock classification and the identification of ancient supply quarries. In the case of marbles, the provenience of the rocks was established by cross-analysis OM and isotope-ratio ^{13}C vs ^{18}O .

OM on mortars identifies the environment origin and typology of aggregates.

Both mortars and stones are subject to physical-mechanical tests in order to obtain densities, porosities, imbibition and saturation indices, tensile and compressive strengths.

In addition, the particle-size distribution (PSD) of mortar aggregates points out information about the production methodology.

A XRPD diffraction associated with SEM-EDS and TGA-DSC analysis on mortar binders recognized alteration mineral phases and established the hydraulicity degree.

In addition μ -XRD with associated μ -Raman spectroscopy and μ -FT-IR have been carried out on the fresco to characterize the pigments and their binder.

By *in-situ* observations and digital image reconstruction, decay mapping of some building portion highlight the diverse alteration forms of the stone.

Accelerated aging tests on samples with analogue lithology to the one used in the selected monument, try to reproduce these alteration forms in laboratory. The aging tests, conducted by climatic chambers, faithfully reproduce the temperature, humidity, capillary rising, CO_2 air content and solar radiation of the environment context where the monuments are located.

All macroscopic morphologic modifications have been represented before and after the aging tests by 3D photogrammetric modelling (online available).

Furthermore, before, after and in some case during the aging tests, a wide series of physical-mechanical parameters (e.g. linear roughness, mass, color changes, mechanical strengths, densities,

P ultrasonic speeds.) and chemical parameters (e.g. efflorescences characterization) have been evaluated. Traditional applied petrography approach allows to observe the actual decay state and accelerated aging tests predict the modalities of decay development in the future.

CAPITOLO 1

Introduzione

Il patrimonio culturale materiale della regione Sardegna (Mediterraneo Centrale, Italia), consiste in un elevato numero di monumenti storici provenienti da diverse culture (e.g. Nuragica, Romana, Fenicio-Punica, Romanica, Aragonese, etc.) che coprono un intervallo temporale dal 1800 AC al 1700 DC (Boriani et al. 1987, Scrima 2014).

Tale patrimonio è rappresentato da beni importanti per l'archeologia, la letteratura, l'arte, la scienza, e l'antropologia e consiste in chiese, fortificazioni, castelli e palazzi storici.

In Sardegna i monumenti storico-architettonici, insieme ai siti archeologici, sono diffusi su tutto il territorio isolano e sono soggetti, oltre che a indagini sui materiali ed a operazioni più o meno sistematiche di scavo, ad azioni di tutela e salvaguardia dalle Soprintendenze locali.

Nell'isola è presente il sito archeologico di *Su Nuraxi* di Barumini, inserito tra i beni Patrimonio dell'Umanità UNESCO, e rappresenta al momento, il migliore esempio della civiltà nuragica in Sardegna.

Negli ultimi anni le Soprintendenze locali hanno iniziato l'opera di valorizzazione del patrimonio culturale sardo attraverso un censimento, e la nascita del catalogo regionale dei beni archeologici, artistici, storici ed etnoantropologici che è parte del sistema informativo del patrimonio culturale della Sardegna (Legge Regionale n. 14 del 20.09.2006, Norme in materia di beni culturali, istituti e luoghi della cultura). Il catalogo raccoglie l'esito dell'attività di censimento del patrimonio culturale e identitario isolano condotto dalla stessa Regione Sarda a partire dal 1996.

Alcuni progetti e ricerche su scala regionale sono stati condotti nell'ambito dei beni culturali come il progetto "*BC² Beni Culturali, Beni Comuni*", realizzato con un'associazione temporanea di imprese composta da Poliste, Interforum e CLES che ha interessato principalmente tre territori della Sardegna: Cabras, Cagliari e Sassari ma prettamente indirizzato allo sviluppo del sistema museale di Mont'e Prama (Cabras), uno dei possibili futuri candidati alle liste del Patrimonio UNESCO.

I siti archeologici della Sardegna sono in gran parte soggetti ad interventi di salvaguardia e *Conservazione Programmata*, tecnica con la quale s'indica il restauro preventivo rivolto prima che verso i singoli beni, verso l'ambiente che li contiene e dal quale provengono tutte le possibili cause del loro deterioramento (Leon 2008, Della Torre 2010).

In particolare è diventato fondamentale, in situazioni di criticità ambientali, la stesura di un piano di monitoraggio e conservazione del bene immobile assicurato mediante una coerente, coordinata e programmata attività di studio, prevenzione, manutenzione ed infine restauro (Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, Art. 29, Sansonetti 2014).

La *Conservazione Programmata* consiste essenzialmente in un piano di monitoraggio per il controllo del bene e del degrado ad esso associato. I piani di monitoraggio si rendono normalmente obbligatori a seguito di un intervento di restauro, ma anche nel caso di monumenti con evidente degrado, gravi criticità statico-strutturali o elevata importanza artistico-culturale.

I piani di monitoraggio sono parte integrante nei monumenti inclusi nelle liste del Patrimonio UNESCO come nel caso del sito archeologico di *Su Nuraxi*. In questi casi, il piano di gestione del sito prevede una fase di studio/conoscenza del bene con l'obiettivo di attivare ricerche sperimentali nel campo della conservazione e della salvaguardia del bene stesso (MiBAC 2008).

In Sardegna negli ultimi anni, le Soprintendenze archeologiche locali hanno realizzato una valutazione dello stato di conservazione dei beni e delle loro condizioni ambientali di custodia, da cui trarre indicazioni per interventi di prevenzione, manutenzione o restauro (Urbani 2000).

Tuttavia, parte dei monumenti non è ancora soggetta ad attenzione, sia per quanto riguarda le operazioni di scavo, sia per quanto concerne le operazioni di salvaguardia.

Il progetto di ricerca di Dottorato qui presentato si concentra sullo studio di alcuni fra i più importanti siti archeologici della Sardegna e si propone, tra gli obiettivi, di ricavare informazioni necessarie ad una maggiore comprensione degli aspetti archeologici e storici dei monumenti, mirando anche alla conoscenza degli aspetti tecnologici e dei materiali lapidei utilizzati, soprattutto in relazione al contesto ambientale.

Come da Fig. 1.1 il progetto di ricerca è articolato in due fasi:

Fase 1: condotta con un approccio di tipo archeometrico classico, consente di incrementare le attuali conoscenze archeologiche del sito, fornendo dati circa le modalità di realizzazione, le tecniche di costruzione, la scelta e la provenienza dei geo-materiali utilizzati nella costruzione.

Fase 2: di tipo prettamente sperimentale, consente di contribuire all'attività di monitoraggio del degrado delle strutture attraverso osservazioni/rilievi *in situ* e la riproduzione del degrado in ambiente controllato (attraverso prove accelerate di durabilità). Il fine è cercare di comprendere le modalità ed i tempi di avanzamento del degrado nei monumenti presenti nei siti oggetto di studio, utili a prevenire il possibile degrado nel futuro.

Il progetto è di tipo multidisciplinare e coinvolge materie tecniche e umanistiche quali: Petrografia applicata, Diagnostica sui Beni Culturali, Architettura, Geotecnica, Storia e Storia dell'arte.

Lo studio è applicato a sei tra i più rilevanti monumenti situati nell'isola, quali:

- i. La Basilica di San Saturnino (Cagliari)
- ii. Il complesso termale del Forum Traiani (Fordingianus)
- iii. Gli edifici delle Piccole Terme e del Teatro (Area archeologica di Nora, Pula)
- iv. Il lastricato del *Cardo* con le Terme II (Area archeologica di Tharros, Cabras).

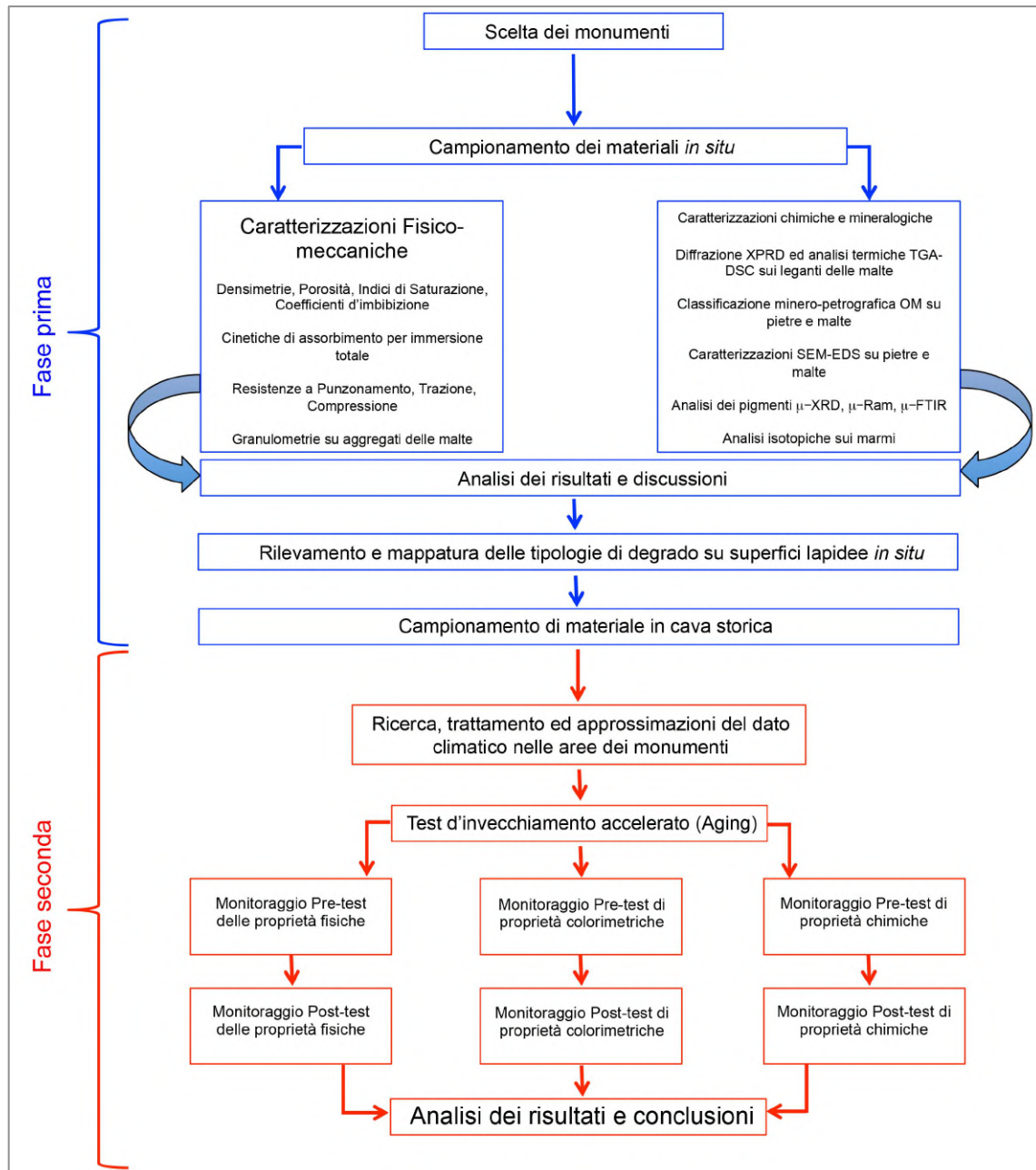


Figura 1.1: Diagramma di flusso delle attività dottorali.

Edificati in un intervallo d'età tra il II sec. AC ed il XII sec. DC, i monumenti rappresentano lo sviluppo di almeno tre culture Mediterranee rilevanti ovvero Fenicio-Punica, Romana e Romanica. Alcuni monumenti (e.g., Basilica di San Saturnino), sono composti da stratigrafie archeologiche

complesse e sovrapposte che offrono, nella stessa struttura, la possibilità di indagare su materiali e metodologie di costruzione relative a diverse culture (vedi Capitolo 2).

I sopra citati monumenti sono edificati con l'utilizzo di pietre locali che, in alcuni casi, oltre ad essere presenti e comuni sul territorio sardo, hanno anche una diffusione nell'area Mediterranea (Columbu et al. 2017, Lisci 2014).

Il campionamento dei materiali *in situ* (vedi Capitolo 5), è stato realizzato in accordo con le Soprintendenze archeologiche locali, durante il quale sono stati prelevati materiali riassumibili in rocce, malte antiche (malte di allettamento, intonaci, etc.) e pigmenti appartenenti a pitture ed affreschi parietali.

Durante la prima fase del progetto, i materiali lapidei e le malte sono stati analizzati in microscopia ottica (OM). Con tale tecnica si è potuto identificare, nelle malte, la tipologia di aggregato utilizzato e la sua provenienza (Miriello et al. 2010, Pavia & Caro 2008, Bultrini et al. 2006), mentre nelle pietre, le osservazioni hanno permesso una classificazione petrografica mediante analisi mineralogica modale e l'utilizzo del diagramma QAPF (Streckeisen 1974) nel caso delle vulcaniti ed altri sistemi di classificazione nel caso delle rocce sedimentarie.

Il confronto dei dati derivanti dalle osservazioni in microscopia ottica tra campioni del monumento e campioni d'affioramento, come già dimostrato in altri casi studio da alcuni autori (Columbu et al. 2018b, Columbu 2018, Columbu et al. 2019b), ha permesso di risalire ai siti di approvvigionamento dei geo-materiali, quasi sempre localizzati nelle vicinanze del sito ed alcune volte addirittura all'interno dello stesso.

Nel caso dei marmi della Basilica di San Saturnino, la provenienza è stata identificata mediante una caratterizzazione isotopica (basata su diagrammi $\delta^{13}\text{C}$ vs $\delta^{18}\text{O}$), i cui risultati di tracciatura sono confrontati con alcuni database o dati presenti in letteratura circa i marmi del continente Europeo (e.g., Lazzarini & Antonelli 2003, Lazzarini et al. 1999, Lapuente 1995, Columbu et al. 2018c).

I risultati ottenuti si allineano con i dati di analisi isotopiche già eseguiti su alcuni campioni di marmi di San Saturnino da parte degli autori Grillo & Prochaska (2014).

Associata alla tecnica OM, l'osservazione in microscopia elettronica SEM-EDS sulle malte ha permesso di eseguire delle analisi puntuali e mappature geochimiche nell'interfaccia legante/aggregato ed identificare la presenza di gel idraulici C-S/A-H con approccio già utilizzato da autori quali Miriello et al. 2010, Vola et al. 2011 e Belfiore et al. 2015 in malte di epoca Romana.

Nell'area archeologica di Tharros, studi ed osservazioni congiunte OM-SEM-EDS sono state già effettuate sulle malte di impermeabilizzazione delle cisterne da Ingo et al. (2004).

Pietre e malte sono state sottoposte a caratterizzazione fisico-meccanica determinando le principali

proprietà dei materiali quali: densità, porosità, cinetica di assorbimento dell'acqua per immersione totale, e relativi coefficienti d'imbibizione, ed alcune proprietà di resistenza meccanica quali: resistenza al punzonamento (mediante Point Load Test), alla trazione ed alla compressione. Le proprietà fisiche delle rocce e delle malte dei monumenti sono spesso indagate negli studi sui Beni Culturali (e.g., Columbu et al. 2018a, 2018b, 2018c, 2016, 2015, Sitzia et al. *in progress*, Veiga et al. 2004), con l'obiettivo di stabilire le modalità di circolazione dei fluidi salini nella pietra ritenuti tra i principali fattori di degrado dei geo-materiali. Associate alle proprietà fisiche, la caratterizzazione meccanica consente di ottenere un quadro preciso circa lo stato di degrado del materiale nel monumento mediante confronto con la pietra non alterata prelevata in affioramento (Cuccuru et al. 2014, Milosevic et al. 2012, Valek & Veiga 2005).

Sulle malte antiche dei monumenti selezionati è stata eseguita l'analisi granulometrica degli aggregati. Nel caso delle malte di San Saturnino, delle Terme II e di Forum Traiani l'analisi è stata fatta mediante metodo distruttivo con attacco acido e setacciatura (in accordo con Sitzia et al. *in progress*, Columbu et al. 2016, Riccardi et al. 1998, Genestar et al. 2006).

Nel caso delle malte delle Piccole Terme (Nora) e degli intonachini di Tharros, l'analisi granulometrica è stata eseguita con metodo semi-distruttivo mediante analisi d'immagine in sezione sottile, risparmiando circa l'80% in peso di materiale che si sarebbe utilizzato con il metodo della tradizionale setacciatura. Il metodo della stima del rapporto L/A in sezione sottile è stato sperimentato da Columbu et al. 2016, mentre sulla composizione del fuso granulometrico ottenuto in analisi d'immagine sono stati eseguiti alcuni studi, incentrati sui vantaggi e svantaggi dell'analisi d'immagine nello studio in sezione sottile (Marioni et al. 2005, Mora et al. 1998) e sulla caratterizzazione geometrica dell'aggregato (Mora et al. 2000).

Per quanto riguarda le analisi mineralogiche sui materiali è stato eseguito uno studio mediante diffrazione a Raggi X (XPRD) sul legante delle malte (Isıkdag & Topçu 2013, Izzo et al. 2016, Bultrini et al. 2016), col fine di verificare la presenza di fasi idrauliche od altre fasi di alterazione della malta altrimenti non risolvibili al solo microscopio polarizzatore.

Nella malta, la stima dell'idraulicità è stata ottenuta con il metodo di Moropoulou et al. (2005, 2004, 2000, 1995) mediante la misurazione delle perdite in peso dei composti volatili H₂O e CO₂ ricavati in termo-gravimetria (TGA).

Sulle malte ed in particolare sugli intonachini di Forum Traiani, la presenza di alcuni *layers* di affreschi è stata indagata mediante tecniche analitiche μ -XRD, μ -Raman e μ -FT-IR, metodiche già utilizzate da diversi autori nello studio dei pigmenti di epoca Romana (Sitzia et al. *in progress*, Miguel et al. 2012, Aliatis et al. 2010, Baraldi et al. 2007, Gutman et al. 2016).

La caratterizzazione dei pigmenti di età Romana provenienti da alcune zone della Sardegna, in

particolare dall'area di Cagliari, è già avvenuta per opera di Froment et al. 2015 e di Solla et al. 2015.

Durante la seconda fase del progetto, in seguito alle caratterizzazioni fisico-meccaniche e geochimiche, sono stati condotti rilievi *in situ* per osservare i processi di degrado nei materiali lapidei e nelle malte (vedi Capitolo 11).

L'osservazione macroscopica dei processi di degrado ha permesso la realizzazione di alcune mappature di degrado secondo abaco Nor.Ma.L 1/88. Cartografie di degrado sui calcari di Cagliari, quali la pietra Forte e la pietra Cantone, erano state già eseguite da Cuccuru et al. 2014 e Fais et al. 2015 sul monumento della Torre dell'Elefante (Cagliari) con lo scopo di definire la qualità del materiale *in situ*.

Per i test di degrado, si è reso necessario prelevare il materiale presso le cave storiche, identificate preventivamente sia grazie a ricerche bibliografiche (vedi Capitolo 3), sia tramite osservazioni microscopiche in sezione sottile (OM), e nel caso particolare dei marmi con analisi isotopiche. Sono state campionate 7 litologie dalle aree di cava utilizzate nella costruzione dei monumenti in esame.

Le litologie sono le seguenti:

- Biomicrite (pietra Cantone), biolitite (pietra Forte) e marmo utilizzati nella realizzazione della Basilica di San Saturnino;
- Vulcaniti a composizione dacitica-riodacitica utilizzate nella costruzione del Teatro di Nora;
- Basalti ed arenarie Tirreniane utilizzate nella realizzazione delle Terme II e del lastricato del *cardo* a Tharros;
- Ignimbriti in *facies* cromatica da rossastra a verdastra, utilizzate nella realizzazione degli ambienti termali di Forum Traiani.

I campioni hanno subito 6 mesi di test di degrado accelerato (*aging test*) con l'utilizzo di una camera climatica FITOCLIMA ed una camera solare SOLARBOX.

L'*aging test* (o invecchiamento accelerato) è una tecnica sperimentale che di norma utilizza condizioni forzate di temperatura, umidità, ossigeno, luce solare, vibrazioni, ecc. per accelerare i normali processi d'invecchiamento dei materiali (Strofer 1990).

Nel dettaglio, nella camera climatica è possibile sottoporre i provini a cambiamenti rapidi e controllati di temperatura, umidità, contenuto di CO₂ nell'aria (camera FITOCLIMA) o radiazione solare (camera SOLARBOX). Ad esempio, i cicli di caldo e freddo, umidità e radiazione solare, possono simulare l'effetto del giorno e della notte in alcune ore o minuti in base al tempo che si desidera.

L'invecchiamento accelerato oggi è praticato soprattutto nella scienza della conservazione di archivi cartacei (Zou et al. 1996, Bansa 2002, Begin & Kamiska 2002), nel monitoraggio delle variazioni di colore di antichi pigmenti in ambienti museali (Osama et al. 2014) e su materiali lapidei (Ghobadi & Babazadeh 2014, Mutluturk et al. 2004, Fioretti et al. 2018, Fioretti 2016).

Nei lavori sopra citati, gli *aging test* su materiali lapidei sono condotti in genere sottoponendo i campioni a cicli di gelo-disgelo (F-T) secondo normativa ASTM D5312, cicli di riscaldamento-raffreddamento (H-C), cicli combinati di riscaldamento, raffreddamento ed immersione totale in acqua (H-C-W) e cicli di cristallizzazione salina (SC) secondo EN12370.

Di norma un ciclo F-T consiste nel sottoporre ciclicamente un provino cubico di 5 cm di lato a temperature di - 20 °C e 20 °C, mentre un ciclo H-C consiste nell'esposizione a 105 °C e - 20 °C.

Sempre per quanto riguarda i materiali lapidei, Mutluturk et al. (2004), eseguendo test di tipo F-T e H-C su campioni di calcare, travertino, marmo e diabasi, hanno proposto un modello di degrado della pietra che misurava la massa di residuo da decoesione delle rocce correlandola con altri parametri come la costante di degrado (k) e l'emivita lapidea ($N1/2$).

Nonostante nei suddetti lavori i test siano stati realizzati secondo normativa, il campione, sia esso lapideo, plastico o cartaceo, viene esposto a temperature o altre condizioni estreme che certamente hanno il potere di accelerare il degrado in breve tempo, ma che risultano, in alcuni casi, completamente al di fuori dei normali range cui il materiale è sottoposto in ambiente naturale.

L'estremizzazione delle temperature o di altri parametri durante l'*aging test*, ha suscitato critiche che parzialmente mettono in dubbio la qualità stessa dell'esperimento, non solo su roccia ma anche ad esempio su materiali cartacei. Ci sono diverse ragioni per questo scetticismo; una comune critica è che il degrado causato da condizioni estreme in breve termine sia diverso dal degrado causato in condizioni naturali nel lungo termine, il che significa che il processo d'invecchiamento accelerato e il processo d'invecchiamento naturale non sarebbero paralleli e confrontabili (Bansa 1989, Bansa 2002).

Per questo motivo, nel campo della conservazione dei materiali cartacei, alcuni ricercatori hanno iniziato a confrontare materiali che hanno subito un invecchiamento accelerato a materiali che hanno subito un invecchiamento naturale (Batterham & Rai 2008).

Al fine di cercare di riprodurre le esatte condizioni ambientali cui il materiale è soggetto sul monumento, negli *aging test* adottati in questo progetto, i campioni sono stati sottoposti ad un test di degrado in camera FITOCLIMA con condizioni di temperatura (T), umidità relativa (rH) e contenuto di CO₂ analoghi a quelli del luogo d'ubicazione del monumento.

Il test non è quindi stato condotto estremizzando le suddette variabili come da normativa, ma segue l'andamento di queste ultime su base ciclica giornaliera e stagionale.

Per accelerare il test, cicli di temperatura, di umidità relativa e concentrazione di CO₂ giornalieri che il materiale riceve su monumento sono stati accelerati e riprodotti in 40 minuti (vedi Capitolo 12).

Alcuni autori come Velosa & Veiga (2006) e Waldum & Anda (1999) hanno condotto *aging test* simili a quello proposto in questo progetto ovvero, utilizzando le temperature di ubicazione del luogo da cui il geo-materiale proviene ma realizzando cicli di F-T e H-C-W.

Per eseguire i test è stata fatta una raccolta di dati meteorologici dei luoghi di ubicazione dei monumenti con l'identificazione dei cicli giornalieri e stagionali relativi ai parametri T, rH e CO₂ (vedi Capitolo 4, 12, 13). I dati sono ricavati dai portali online ARPAS (Agenzia Regionale Protezione Ambiente), AM (Aeronautica Militare) e dal simulatore meteorologico online GIOVANNI, (NASA, National Aeronautics and Space Administration) ed hanno riguardato il trentennio 1971-2000.

Per rendere l'esperimento ancora più assimilabile alle condizioni di ubicazione del campione *in situ*, in camera FITOCLIMA oltre al controllo dei suddetti tre parametri T, rH e CO₂, su un certo numero di provini sono stati effettuati test di risalita capillare (e cristallizzazione salina, SC) con acqua salina prelevata *in situ* in modo da ricreare il più fedelmente possibile le condizioni naturali della pietra in monumento. Nella restante parte dei provini la risalita capillare è stata realizzata utilizzando acque meteoriche al fine di riprodurre l'effetto della pioggia e confrontare le differenze di degrado tra materiali soggetti ad acque saline ed acque con scarse concentrazioni di sali come quelle piovane.

I test di cristallizzazione salina SC su materiali lapidei sono stati realizzati da diversi autori (Velosa & Veiga 2006, Frasca & Yamamoto 2006), secondo la normativa EN12370 in cui si stabilisce l'uso di una soluzione con 14% vol. di Na₂SO₄.

Nel 1991 Atzeni et al. proponevano un test di cristallizzazione salina con soluzioni di NaCl e Na₂SO₄ testate sulla pietra Cantone al fine di riprodurre il danno derivato dall'aerosol marino.

Nel nostro caso, l'acqua utilizzata nella risalita capillare nei provini in dacite/riodacite, basalto ed arenaria Tirreniana è di tipo marino e simula le condizioni ambientali delle Piccole Terme e del Teatro di Nora, dove concavità nelle superfici del basolato e nei gradini del Teatro permettono l'accumulo di pozze d'acqua meteorica che si tramuta velocemente in acqua ad alto contenuto salino per via dell'interazione con l'aerosol marino presente nell'aria.

Un processo analogo di salinizzazione dell'acqua avviene anche a Tharros, dove a causa della frequente presenza di vento Maestrale, con punte di velocità sino a 100 km/h, in atmosfera è presente un elevato contenuto di spray marino. In alcuni casi a Tharros si verifica direttamente la

deposizione sulle strutture di acqua marina dovuta agli schizzi dell'onde che si infrangono sulle scogliere antistanti il sito archeologico.

Nei campioni di pietra Forte, pietra Cantone e marmo sono stati realizzati test di risalita capillare con acqua di falda prelevata nella zona della Basilica di San Saturnino.

Questa prova ha il fine di simulare l'effetto dell'acqua della falda acquifera, profonda solo pochi metri, che in caso di forti temporali provoca un allagamento della cripta per poi risalire capillarmente sino alle parti basse del monumento coinvolgendo le murature interne realizzate con questo tipo di pietra.

Nei campioni d'ignimbrite di Fordongianus (utilizzati nel sito di Forum Traiani) i test di cristallizzazione salina sono stati eseguiti con il prelievo di acqua termale che ancora è presente nel sito come risorgiva poco lontano dalla *Natatio*.

La prova ha il fine di simulare la risalita capillare nei materiali posti nelle zone basse dei paramenti murari posti in contatto con le acque di risorgiva.

Un'ampia serie di parametri fisico-meccanici e chimici (vedi Capitolo 13), sono stati misurati in fase pre e post *aging test* ed alcuni altri ad intervalli di 15 giorni.

L'obiettivo finale è quello di stabilire una relazione tra le caratteristiche chimico-fisiche di una litologia e la sua capacità di resistenza al degrado ambientale al fine di sviluppare e approfondire le conoscenze sui processi di degrado investigando sulle loro modalità di esplicazione e la conseguente velocità di avanzamento per predire le stesse nel futuro.

Già alcuni autori hanno indagato le variazioni delle proprietà meccaniche durante gli *aging test* con la misurazione della velocità di onde longitudinali e trasversali, la massa del campione (Barbera et al. 2012), e alcune resistenze meccaniche quali compressione e trazione (Molina et al. 2013, Yavuz 2006).

Alcuni autori hanno inoltre caratterizzato la roccia dal punto di vista mineralogico con la diffrazione ai Raggi X al fine di verificare la presenza di efflorescenze data dall'interazione soluzione salina-pietra (Urosevic et al. 2010, Velosa & Veiga 2006).

In questo progetto, per avere una evidenza visiva immediata delle variazioni morfologiche di superficie, la comparsa di processi alterativi ed altri fattori osservabili macroscopicamente, ognuno dei provini 5x5x5 cm "madre" è stato riprodotto tridimensionalmente prima e dopo l'*aging test*, mediante tecnica fotogrammetrica con modelli caricati direttamente online in un apposita interfaccia web ad accesso libero.

Una seconda camera climatica (SOLARBOX) è stata utilizzata per i test accelerati con la variazione del parametro irradianza (vedi Capitolo 13) e conseguente monitoraggio della colorazione superficiale dei campioni ad intervalli di 15 giorni. Esperimenti simili, sono già noti in bibliografia

circa il monitoraggio della variazione cromatica di consolidanti protettivi applicati sulla pietra (Rosso et al. 2016, Striani et al. 2016). Studi di variazione cromatica su roccia senza consolidante invece, come nel nostro caso, sono piuttosto rari. Navarro et al. (2019) hanno investigato sulle variazioni cromatiche della serpentinite esposta a raggi UV mentre sulle rocce della Sardegna Careddu & Marras (2013) hanno misurato la variazione della brillantezza e di alcuni altri aspetti cromatici sui calcari di Orosei.

Contesti geografico, storico ed architettonico dei siti archeologici

2.1 Le Piccole Terme ed il Teatro di Nora (Pula, Sardegna, Italia)

Le Piccole Terme (Fig. 2.1.1b) sono ubicate nel settore orientale della città storica di Nora (Sardegna Sud-Occidentale, Italia), oggi area archeologica ricadente nel comune di Pula. Le sue coordinate sono $38^{\circ}59'03,05''\text{N} - 9^{\circ}00'52,66''\text{E}$, con elevazione di 1 m s.l.m. (Fig. 2.1.1a).

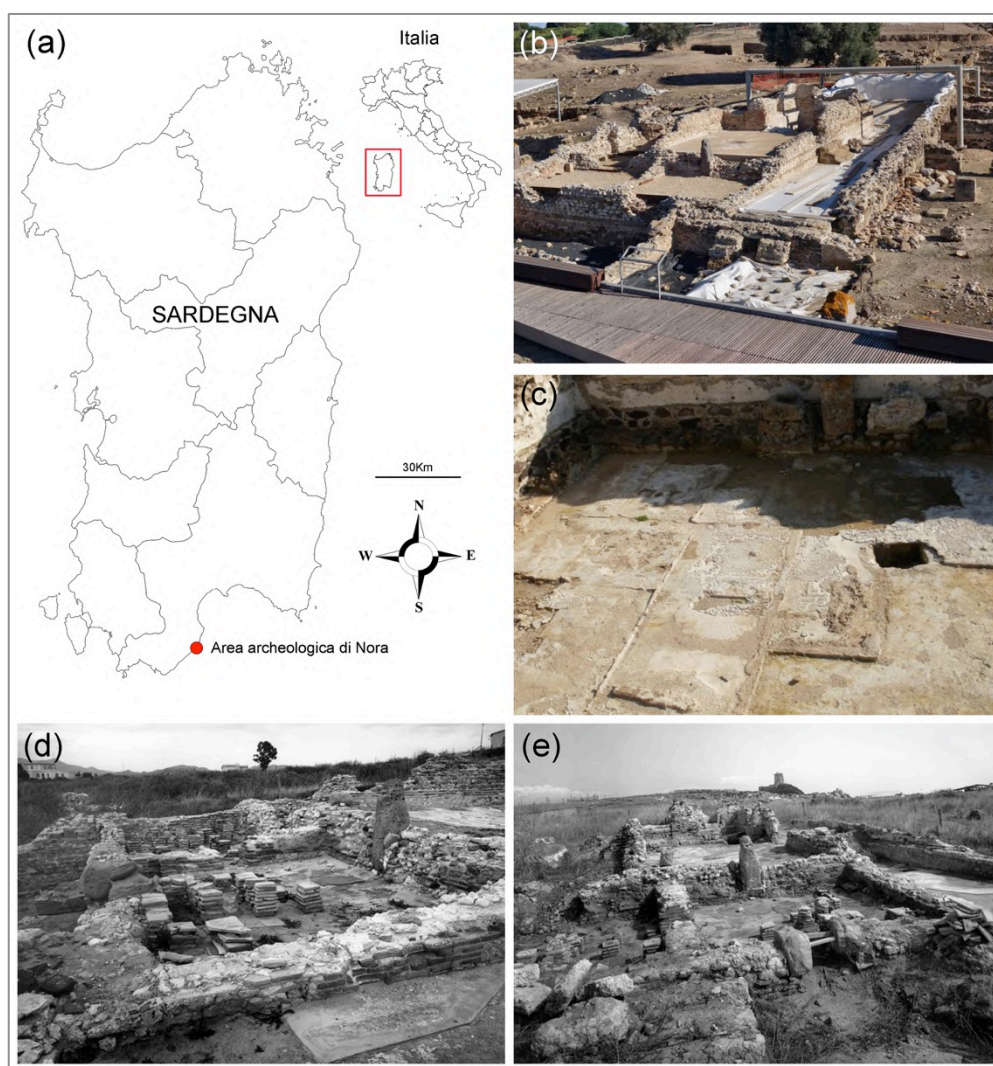


Figura 2.1.1: Piccole Terme di Nora: (a) inquadramento geografico, (b) l'edificio visto da Sud, (c) superficie di calpestio del vano in prossimità del *Frigidarium*, (d, e) campagna di scavo degli anni 50.

Le Piccole Terme risultano costituite da un edificio cui si può accedere attraverso delle gradinate che portano ad un corridoio. Il pavimento è decorato da un mosaico risalente al IV secolo DC come tutti i mosaici di questo edificio. Nel corridoio si aprono numerosi pozzetti e lungo le pareti

meridionali corre un bancone che prosegue nel successivo ambiente anche questo mosaicato. Il bancone, presenta delle aperture regolari coperte alla cappuccina con tegole, cosa che permette di riconoscere la funzione come *Apodyterium* (ambiente termale adibito a spogliatoio). Dal corridoio si eccede, tramite una piccola scala, al *Frigidarium* (ambiente termale destinato ai bagni freddi). Di forma pressoché quadrata, il *Frigidarium* è mosaicato: al centro si apre un pozzetto per il deflusso delle acque che affluivano nella vasca, con tre nicchie absidate, poste ad Est. In epoca tarda questa vasca fu adibita a forno, rialzandone il pavimento (Tronchetti 1984). A fianco del *Frigidarium* si trova il *Calidarium* (ambiente termale destinato ai bagni di vapore), riscaldato da un sistema *Praefurnium* (forno adibito al riscaldamento degli ambienti termali) sito a Est, ancora visibile ad un livello più basso, a lato del quale si trova la scaletta di accesso allo stesso. Ad Ovest del *Frigidarium* e del *Calidarium* si ritrovano due vani, di cui purtroppo non rimane più il pavimento originario (Fig. 2.1.1c) In essi (o almeno in uno di essi) si riconoscono due ambienti a temperatura moderatamente calda (*Tepidaria* o *Tepidarium*), di passaggio dal *Frigidarium* al *Calidarium*, secondo un percorso ad andamento anulare. Una prima fase di scavo documentata nell'edificio risale agli anni 50 (Fig. 2.1.1d, e). L'edificio delle Piccole Terme ad oggi non è ancora stato sottoposto ad opere di restauro.

Il Teatro di Nora è ubicato nel settore centro-orientale della città storica di Nora (Sardegna Sud-Occidentale, Italia) oggi area archeologica. Le sue coordinate sono 38°59'03,93''N – 9°00'59,26''E, con elevazione di 3 m s.l.m (Fig. 2.1.2a). E' senza dubbio uno degli edifici meglio conservati di Nora.

L'edificio presenta una fronte semicircolare con asse W-NW, in opera isodoma, costituita prevalentemente da blocchi squadrati di arenaria, decorata a metà altezza da una banda modanata; il paramento murario risultava movimentato dalla presenza di otto nicchie in mattoni, voltate ad archi scemi (ossia a sesto ribassato) a pianta quadrata, i quali, a coppie, precedevano, si alternavano alle tre rampe d'accesso (*Vomitoria*) alla platea (*Cavea* Fig. 2.1.2b) e le seguivano (Coroneo 1993).

La zona posteriore, rivolta E-SE mostra una fronte rettilinea racchiusa da un porticato colonnato da dieci pilastri che si apriva sul foro centrale (*Porticus Post Scaenam*). Il porticato era in comunicazione col Teatro mediante due ingressi (Fig. 2.1.2c) che comunicavano con altrettanti ambienti a pianta rettangolare (*Parasceni*), collocati ai lati del palcoscenico (*Pulpitum*).

Gli spettatori accedevano tramite tre scale che si aprivano lungo il perimetro esterno dell'emiciclo e raggiungevano la platea percorrendo il corridoio che coronava superiormente le gradinate e le tre scalette radiali (*Scalaria*) che dividevano in quattro settori (*Cunei*) l'ampio spazio a sedere. I personaggi di rango (soprattutto i sacerdoti ed il finanziatore dello spettacolo), invece, accedevano direttamente dal porticato fronteggiante il foro, attraversavano i parasceni e salivano le scale

collocate di fianco al palcoscenico, fino a raggiungere le due tribune (*Tribunalia* Fig. 2.1.2d) soprastanti i due ingressi voltati (*Conformicationes*) collocati all'incrocio tra la platea e il palcoscenico (Tronchetti 1984).



Figura 2.1.2: Teatro di Nora: (a) inquadramento geografico, (b) cavea, (c) tunnel d'ingresso, (d) *Tribunalia*, (e) muro di retropalco, (f, g) muro di frontescena.

Tra la platea occupata dagli spettatori e il palcoscenico era presente uno spazio semicircolare (*Orchestra*) con pavimentazione mosaicata mentre il restante pavimento era realizzato in *Opus Sectile*. Gli spettatori assistevano agli spettacoli soprattutto nella buona stagione, visto che il Teatro era un edificio a cielo aperto; solo nelle giornate particolarmente assolate, si ricorreva ad ampi tendoni che venivano distesi sopra della platea (Garau 2005). Prova del fatto che il Teatro era sprovvisto di copertura permanente e data dalla presenza di un canaletto di sfogo (*Euripus*) per le acque meteoriche defluenti dall'orchestra tramite un pozzetto di raccolta ad esso collegato. Lo spettacolo si svolgeva su un ampio palcoscenico, decorato sul lato prospettico dove, sul basso muretto in mattoni della ribalta, si aprivano quattro nicchie absidate ospitanti delle statue. Alle estremità del muretto di retropalco (Fig. 2.1.2e), s'inserivano due scalette di tre gradini, le quali mettevano in comunicazione palcoscenico e orchestra (Coroneo 1993).

Il vano sottostante il palcoscenico (*Hyposcenum*) non era visibile agli spettatori ed era un ambiente rettangolare anzitutto di servizio (6 x 4 x 1,40m), oltre che funzionale alle soprastanti strutture. Alle spalle del palcoscenico, s'innalzava il muro del frontescena (*Scaene frons* Fig. 2.1.2f, g).

Il Teatro fu portato interamente alla luce dall'archeologo Gennaro Pesce nel 1952, tempi in cui l'archeologia procedeva ancora a livello quasi pionieristico; pertanto, fu sottoposto ad uno sterro piuttosto che ad uno scavo scientifico, senza registrazione, né documentazione di quasi alcun dato fondamentale per l'inquadramento cronologico. Volendo ripercorrere le fasi edilizie del monumento, va anzitutto detto che per la costruzione dell'edificio, fu modificato l'assetto edilizio dell'area; infatti, in base agli ultimi sondaggi, si è documentata la presenza di una più antica costruzione colonnata ad esso preesistente le cui murature vennero interamente rasate.

La cronologia fornita da Pesce è centrata sul III sec. DC (Pesce 1972, Courtois 1989) sulla base del ritrovamento di una moneta Adrianea nelle fondamenta del portico collocato alle spalle della scena, e di quattro orci (*Dolia*), di cui uno con bollo di fabbrica, nell'iposcenio, riportava il monumento ad un unico momento costruttivo (epoca Traiano-Adrianea). Questa cronologia non era precisa né completa. Si è dovuto attendere gli anni '90 (Bejor 1993) per avere sicuri riferimenti cronologici supportati dai dati di scavo. Con le ultime indagini, svolte soprattutto in un punto ubicato lungo il margine esterno dell'edificio, si è scoperto che il Teatro venne edificato in tre fasi, delle quali la più antica sarebbe da inquadrare nel periodo augusteo o Giulio-Claudio (Wilson 1980).

Durante la prima fase, furono costruiti la platea gradinata di 11 ordini originari, la scena con le relative parti, ed infine le scale conducenti alle logge (*Tribunalia*).

Volendo dare maggiore profondità al palcoscenico, durante la seconda fase edilizia se ne costruì uno nuovo, molto più avanzato rispetto al primo, il cui lato prospettico venne fasciato da un muretto in mattoni; ai lati del nuovo pulpito, si aprirono due porte che davano accesso all'iposcenio (Garau

2005). Sempre a questa seconda fase risale l'abbassamento del piano dell'iposcenio e la nuova fabbrica del canaletto di sfogo delle acque meteoriche (Pesce 1972).

Nel corso degli scavi di Pesce, la pavimentazione dell'orchestra venne sottoposta a restauri ed integrata piuttosto pesantemente nelle parti lacunose, è così difficile fornire un preciso riferimento cronologico.

Dopo che gli scavi di Gennaro Pesce riportarono alla luce la città, con il passare del tempo, tutte le strutture subirono un notevole decadimento rendendo problematica la scelta di un adeguato intervento di restauro: i ruderi, già privi delle coperture e dei rivestimenti originari, esposti alle intemperie, hanno subito danni dovuti alla penetrazione delle acque meteoriche e alla cristallizzazione dei sali portati dall'aerosol marino. Il sito archeologico di Nora fra cui il Teatro, sono stati sottoposti negli anni a vari interventi di restauro, non sempre riusciti, volti a rallentare i processi di degrado. Alcuni autori (Massidda et al. 1994, Massidda & Sanna 1994), hanno evidenziato come i processi di degrado siano stati accelerati anche dall'utilizzo d'impregnanti polimerici nel restauro del 1979, la cui funzione primaria era quella di costituire uno schermo contro l'aerosol marino.

2.2 La Basilica di San Saturnino (Cagliari, Sardegna, Italia)

La Basilica di S. Saturnino (Fig. 2.2.1b, c, d) si trovava, fino al secolo scorso, nell'immediata periferia Est del centro urbano di Cagliari che l'ha progressivamente inglobata pur mantenendola in una zona verde di rispetto (Buffering zone, Fig. 2.2.1e, f); le coordinate geografiche del sito sono: 39°12'49,77"N – 9°07'23,73"E, con elevazione di 12 m s.l.m. (Fig. 2.2.1a).

Il sito corrisponde al settore di necropoli orientale tra la chiesa di S. Lucifero e il colle di Bonaria, finora la più antica area funeraria cristiana individuata a Cagliari, con sepolture risalenti alla metà del IV secolo (Coroneo 1993). La prima menzione documentaria del monumento fu di Fulgenzio vescovo di Ruspe. Quest'ultimo, esiliato in Sardegna assieme ad altri vescovi africani dal Re vandalo Trasamondo, soggiornò due volte a Cagliari (post 507-515 DC e 519-523 DC) dove vi fondò un monastero *Iusta Basilicam Sancti Martyris Saturnini* (Coroneo 1993).

Nel 1089 il monastero fu donato dal giudice cagliaritano Costantino-Salusio II de Lacon-Gunale ai Vittorini di Marsiglia, che lo elessero sede del priorato sardo e ne ristrutturarono la chiesa con stili protoromanici, riconsacrandola nel 1119. Il monastero subì gravi danni nel 1324 durante l'assedio del Castello pisano di Cagliari da parte degli Aragonesi, accampati in un recinto fortificato che includeva la chiesa (Coroneo 1993).

Agli inizi del nostro secolo ebbe inizio una serie dei restauri (Kirova 1979), tra cui quello successivo ai danni subiti nei bombardamenti aerei del 1943 (Fig. 2.2.1g, Delogu 1954).

Il monumento è parzialmente chiuso al pubblico dal 1978, a causa di restauri condotti con metodologia alquanto discutibile ed a causa di una indagine archeologica, che segnala reperti fittili di una classe avvicinata alla cosiddetta "ceramica dipinta", documentata in Italia meridionale tra la fine del XI e la prima metà del XIII secolo (Giuntella 1987), probabilmente di fabbricazione protoromanica.

Fra il 1089 e il 1119 avvenne la ricostruzione dei quattro bracci, di cui sopravvive integro soltanto quello orientale trinavato e absidato, con paramento di calcare cavato nel vicino colle Bonaria ed accenni di bicromia nell'inserito di conci in pietra scura e uso abbondante di spogli marmorei (capitelli, colonne, basamenti, frammenti di trabeazione Tardoromani). Il sistema strutturale è proprio dell'area Franco-Iberica. La navata mecliana ha una volta a botte impostata su cornice e scandita da archi doubleaux. Le navate laterali hanno volte a crociera in cantonetti a spina di pesce, con archi trasversi fra le campatelle e archi formeri nei muri perimetrali, impostati su semicolonne. Nella testata della navatella meridionale si apre esternamente una porta lunettata con arco di scarico gradonato a spigolo vivo e architrave ottenuto da un frammento marmoreo tardoromano. L'unica porta Romanica superstite è presente nello specchio fra le paraste raccordate da archetti monolitici a doppia ghiera come quelli lungo il terminale Sud della navata mediana i cui muri sono partiti da

lesene e aperti in oculi circolari. L'abside (affacciato a Sud-Est), molto ampio, ha perso il rivestimento esterno, ipotizzabile in cinque specchi divisi da semicolonne di cui restano le basi marmoree nella scarpa in opera bicroma.

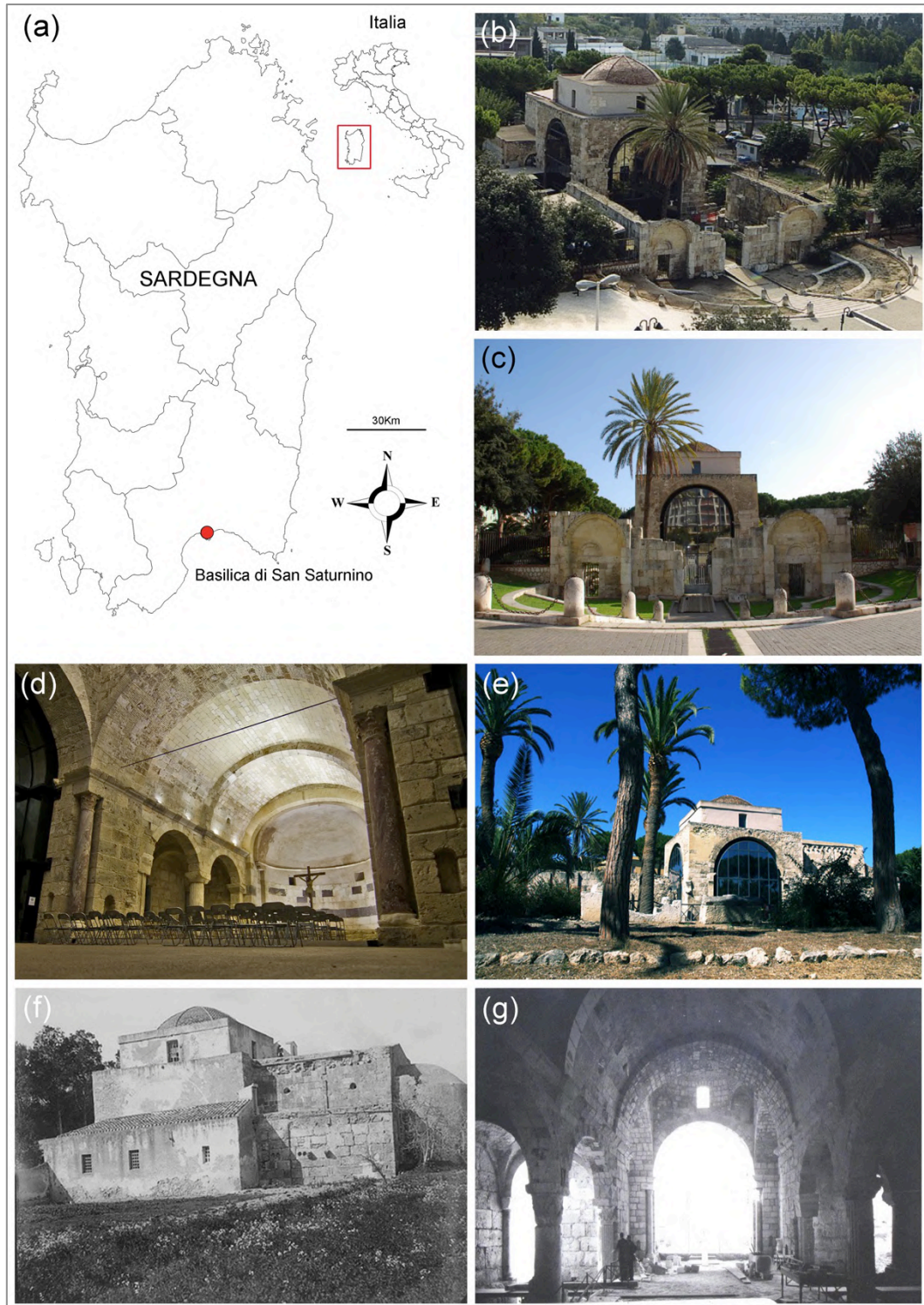


Figura 2.2.1: Basilica di San Saturnino: (a) inquadramento geografico, (b) vista verso Sud-Est, (c) facciata principale, (d) navata principale, (e) area di buffering Sud nell'anno 2015, (f) area di buffering Sud nell'anno 1905, (g) Restauri degli anni 40.

Anche all'interno dell'abside il paramento calcareo è spezzato cromaticamente da un filare di roccia scura e da blocchi di marmo bianco.

Con missiva del 29 Agosto 1087, papa Vittore III esortava l'arcivescovo di Cagliari e primate di Sardegna, e gli altri presuli isolani al restauro delle chiese cadenti (Boscolo 1958).

Nel 1089 la Basilica di San Saturno fu ceduta da Costantino-Salusio II de Lacon-Gunale, giudice di Cagliari, all'abbazia di S. Vittore di Marsiglia. I Vittorini ricostruirono il monastero e istituirono in S. Saturno la sede del priorato cagliaritano (Boscolo 1958).

All'iniziativa dei priori Vittorini si devono la ristrutturazione operata in forme protoromaniche sotto la direzione di un architetto provenzale tra il 1089 e il 1119 (anno della riconsacrazione).

Secondo la sequenza stratigrafica archeologica, nell'area cimiteriale vi era una struttura Sud Tardo-Punica a grossi blocchi bugnati (III sec. AC) e una necropoli Romana del II-IV sec. DC (Necropoli Nord).

2.3 Il lastricato del *Cardo* e le Terme II (Grandi Terme) di Tharros (Cabras, Sardegna, Italia)

L'antica città di Tharros, oggi area archeologica comprende vari edifici e percorsi fra cui le Terme II ed il *Cardo*. E' localizzata sul promontorio di capo San Marco, (penisola del Sinis, Sardegna Centro-Occidentale). Il centro cittadino si trova nella zona centrale della penisola con coordinate geografiche: 39°52'24,30"N – 8°26'27,73"E (Fig. 2.3.1a).

Il sito archeologico è realizzato su un'area collinosa con elevazioni da 0 a 30 m s.l.m. ricadente nell'attuale comune di Cabras.

Il nome del sito, di chiara origine protosarda, è ricondotto ad una radice mediterranea "*tarr*" (Aquaro & Finzi 1986).

La stessa base si ritrova, ad esempio, nel toponimo Tarrài (Galtelli) o, fuori dall'isola, Tarracina (Lazio) o Tarraco (*Hispania Citerior*, Aquaro & Finzi 1986).

La città fu fondata dai Fenici nel VIII sec. AC in vicinanza di un preesistente villaggio nuragico dell'età del bronzo localizzato nella parte alta della città (Zona Nord).

Quest'ultimo, denominato Su Muru Mannu, sopra il quale fu impiantato il *Tofet* (santuario), venne abbandonato pacificamente dai suoi abitanti che, stando ai dati archeologici, collaborarono con i fenici alla costruzione del nuovo centro urbano (Aquaro & Finzi 1986).

Sotto la dominazione cartaginese, la città venne fortificata e ampliata in modo da incrementare rapporti commerciali con l'Africa, la penisola iberica e Massalia (attuale Marsiglia).

Secondo dati storici la città fu conquistata da Roma nel 238 AC, immediatamente dopo la prima guerra Punica, e pochi decenni dopo (215 AC) fu uno degli epicentri della rivolta anti-Romana capeggiata da Ampsicora (Meloni 1975). In età imperiale ci fu un intenso rinnovamento urbanistico con la costruzione delle Terme, dell'acquedotto e la sistemazione della rete viaria con lastricato in basalto.

La città ottenne lo status di *municipium* di cittadini romani (Aquaro & Finzi 1986).

Dopo la caduta dell'Impero romano d'occidente, Tharros, governata prima dai Vandali e poi dai Bizantini e vessata dalle incursioni saracene, entrò progressivamente in una profonda crisi che portò all'abbandono del sito intorno al 1050.

Prima del suo abbandono la città divenne la capitale del giudicato di Arborea; la giudicessa Nibata e il giudice Orzocco I de Lacon-Zori trasferì ad Oristano la sede vescovile e l'intera popolazione Tarrense. Celebre è il detto "e sa cidad'e Tharros, portant sa perda a carros", letteralmente "dalla città di Tharros portano le pietre a carri a dimostrazione del fatto che la vicina città di Oristano venne fondata con i resti lapidei dell'antica colonia Fenicia.

All'interno della città, di particolare importanza risulta il *Cardo* viario (Fig. 2.3.1b).

Quest'ultimo, chiamato anche cardine (che significa "polo", "punto cardinale") è una via che correva in direzione Nord-Sud nelle principali città romane. Esse erano solitamente basate su uno schema urbanistico ortogonale, ossia suddivise in isolati quadrangolari uniformi, in particolare per quanto riguarda le fondazioni coloniali (Rendina 2007, Giardina 2008).

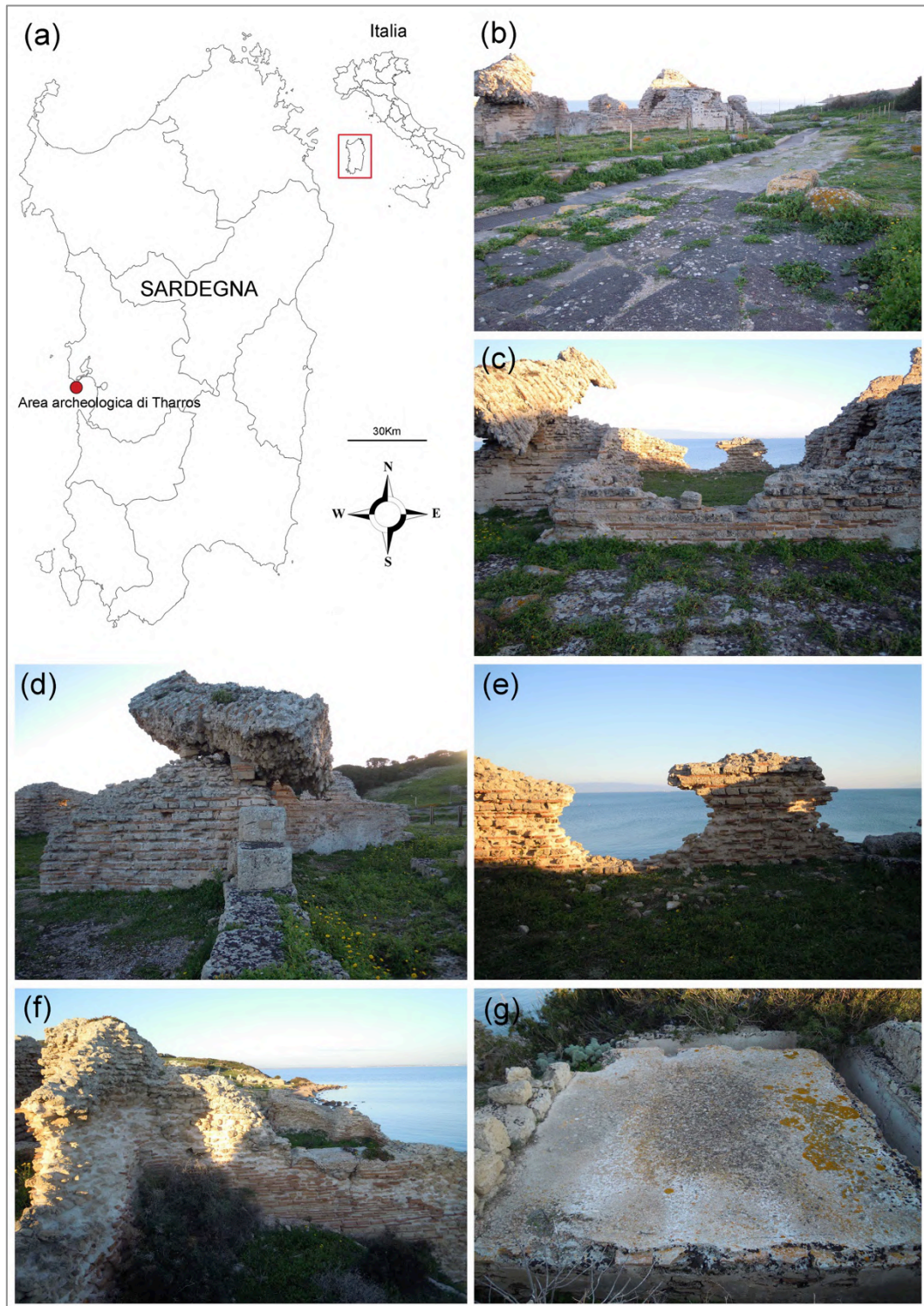


Figura 2.3.1: L'area archeologica di Tharros: (a) inquadramento geografico, (b) *Cardo* viario, (c) *Frigidarium*, (d) resti della volta collassata nell'*Apodyterium*, (e) *Frigidarium*, vista verso Ovest, (f) *Tepidarium* Est, (g) cisterna idrica.

Il termine *Cardo* veniva infatti utilizzato per indicare una delimitazione in direzione Nord-Sud nella centuriazione Romana, ossia la divisione del territorio di una colonia in lotti che venivano assegnati ai singoli coloni. Il *Cardo* viario di Tharros è realizzato con conci di basalto ed ha una lunghezza di circa 400 m con una larghezza che in alcuni punti è pari a 6 m. Al di sotto del Cardine, nella parte alta della città è situata la Cloaca che per un tratto è stata coperta da una tavolata in legno per consentire l'accesso ad entrambe le sponde del fossato. Il *Cardo* termina in zona Sud in prossimità dell'edificio in analisi delle Terme II chiamate anche "Grandi Terme".

La struttura, ubicata al limite meridionale dell'area archeologica, venne scavata nel corso del 1956. L'edificio si articola su tre livelli, comprendendo uno spogliatoio (*Apodyterium*, Fig. 2.3.1d), dotato di un bancale in muratura con stipetti triangolari per custodire i calzari, un *Frigidarium* (Fig. 2.3.1c, e) con due vasche e pavimento mosaicato, due *Tepidarium* (Est, Fig. 2.3.1f e Ovest) e un *Calidarium* con due absidi. L'alimentazione idrica delle Terme era assicurata dalla presenza di una grande cisterna situata a Sud-Est, e rivestita in malta a *Cocciopesto* (Fig. 2.3.1g). È considerata dubbia invece la funzione di quattro sale A, B, C, D posizionate in zona Sud e costruite in parallelo che probabilmente avevano la funzione di magazzino o spogliatoio (Aquaro & Finzi 1986). L'edificio termale ha due punti di accesso, il primo, con tutta probabilità il principale, è posizionato a Nord, zona nella quale un piccolo percorso lastricato si dirama dal *Cardo* viario per immettersi ad Est in prossimità dell'*Apodyterium*. Un secondo accesso alla Spa, è situato circa 45 metri a Sud rispetto all'entrata principale.

2.4 Il Forum Traiani (Fordongianus, Sardegna, Italia)

L'area archeologica del Forum Traiani, in apprezzabile stato di conservazione, ricade al margine Nord-Ovest dell'odierno abitato di Fordongianus, comune situato nella Sardegna centrale (Fig. 2.4.1a). Il sito è realizzato su terrazzi fluviali presso la riva sinistra del vicino fiume Tirso. Le coordinate geografiche sono: 39°59'49,19''N – 8°48'30,16''E.

Il sito è ubicato nell'area delle acque calde sorgive di *Caddas*, già conosciute e denominate nel sec. II DC come *Udata Ypsitanà – Aquae Ypsitanae* (Serra & Bacco 1996).

Epicentro del complesso insediativo è un composito corpo di fabbrica, nel quale si distingue, per la tecnica costruttiva in *Opus quadratum* edificato in corrispondenza delle fonti termali e compone il nucleo originario dell'insieme edilizio (Terme I). Tale comparto fu successivamente ampliato in una seconda fase costruttiva con un secondo impianto, diversificato nell'articolazione planimetrica, nell'organizzazione funzionale e sul piano cronologico (Terme II). Esso si caratterizza, infatti, quale *Therma* a riscaldamento artificiale, con finalità igienico-ricreative.

Le Terme I sono caratterizzate da porticato con *Natatio* rettangolare orientata Est-Ovest con superficie di 193 m² (Fig. 2.4.1b, c, d).

Contornata da gradini e riservata ai bagni per immersione, riceveva e riceve tuttora l'acqua termale dalla contigua vasca di captazione del fianco Ovest. Dei porticati oggi, solo quello meridionale, interamente conservato anche nella volta a botte che si proietta con un pregevole prospetto archivoltato a sette luci, nel quale si apprezza l'armonica orditura dell'opera quadrata (Serra & Bacco 1996). Ad Est del nucleo centrale si trova il *Ninfeo*. Posto in luce nel corso degli scavi recenti (1995 -1996), presenta una superficie rettangolare di 60 m².

Come attestano i relativi documenti epigrafici, l'ambiente è lo spazio del sacro, specificatamente destinato al culto delle Ninfe *Salutares*, *Sanctissimae*, *Augustae*, al cui favore, insieme ad Esculapio, dio della medicina, erano attribuiti i poteri curativi delle *Aquae calidae*. Il *Ninfeo* con i suoi resti colonnari (Fig. 2.4.1f) è in comunicazione con la *Natatio* centrale con una gradonata nei lati brevi e contornata da nicchie quadrangolari.

Posto in simmetria al *Ninfeo* un vano allungato fiancheggia ad Ovest la *Natatio* porticata, di incerta destinazione d'uso per via delle ristrutturazioni e delle modifiche funzionali succedutesi nel tempo.

Ancora a Ovest del vano rettangolare, una vasca di captazione quadrangolare si trova in concomitanza del vano rettangolare con muro perimetrale affacciato a Sud-Ovest. Questa racchiude la polla delle *aquae calidae*, sgorganti alla temperatura di 54 °C. L'impostazione disassata della vasca e l'impiego nella stessa della trachite rosata, diversa dalla pietra d'uso originaria grigio-

verdastra, denunciano un marcato intervento di rielaborazione del manufatto, probabilmente intorno al III-IV sec. DC (Serra & Bacco 1996).

Il macro-ambiente delle Terme II si trova nell'area meridionale del sito.

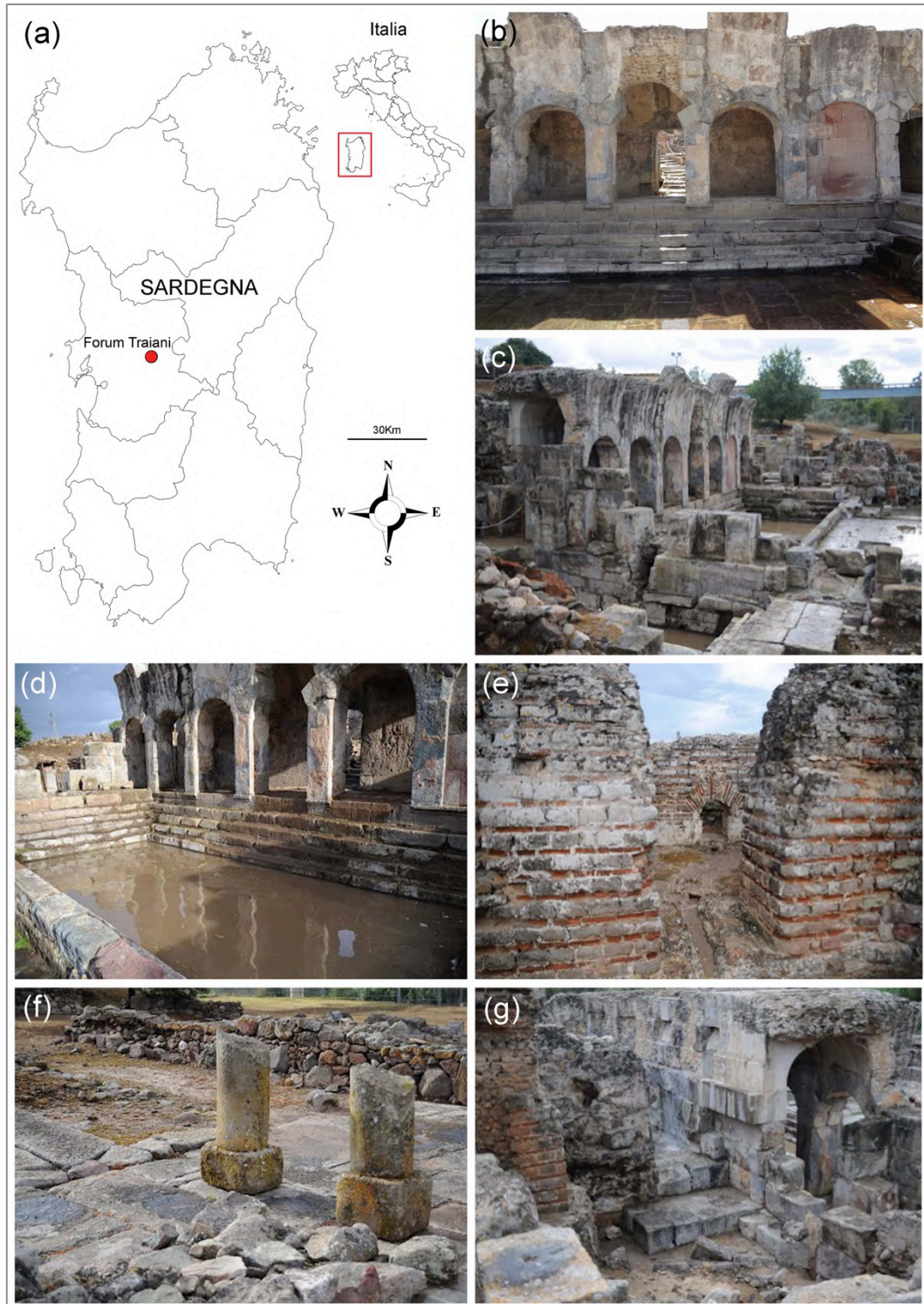


Figura 2.4.1: Forum Traiani: (a) inquadramento geografico (b) *Natatio*, (c) *Natatio* vista da Est, (d) vasca d'acqua fredda, (e) tecnica costruttiva in *Opus testaceum*, (f) resti colonnati nel *Ninfeo*, (g) *Apodyterium* delle Terme II.

Di superficie quasi tripla rispetto alle Terme I è preceduto da due ampie articolazioni interpretabili come atrio e palestra e si compone di sei vani funzionali alla balneazione: l'*Apodyterium* o spogliatoio, il *Frigidarium* riservato ai bagni freddi, il *Tepidarium* per i bagni tiepidi, un secondo *Tepidarium* o forse *Laconicum* per i bagni di sudore, infine due *Calidaria* per i bagni caldi.

Nei diversi ambienti d'uso si registra la messa in opera di tecniche edilizie variate, contraddistinte dall'impiego dell'*Opus caementicium* con paramento ora in scapoli lapidei, ora in corsi regolari alternati di laterizi e tufelli (*Opus vittatum mixtum*), ora di soli laterizi (*Opus testaceum* Fig. 2.4.1e). Alcune testate murarie sono sottolineate da blocchi squadrate di media pezzatura.

Per quanto riguarda i veri o propri ambienti termali si registra la presenza di un *Apodyterium* non riscaldato con probabile funzione di spogliatoio (Fig. 2.4.1g). Il vano ha pianta quadrangolare (3,20 m x 3,80 m), in *Opus vittatum mixtum* e pavimento con *Tegulae hamatae* di probabile reimpiego.

Un *Frigidarium* quadrangolare (6,55 m x 6,80 m), riservato al bagno freddo è dotato di due vasche; una rettangolare, l'altra absidata con breve spalletta e gradini di discesa.

L'edificio è realizzato con tecnica edilizia composita, con l'impiego diffuso dell'*Opus vittatum mixtum* su preesistenze di blocchi squadrate e nelle restanti articolazioni murarie, di modesto spessore (0,60 m). Il piano pavimentale, oggi in malta a *Cocciopesto*, era in origine mosaicato mentre le pareti conservano ancor oggi tracce di rivestimento di lastre marmoree (Serra & Bacco 1996).

Il centro dell'intero edificio di Terme II è occupato da un cortile trapezoidale (16 m x 11/7,70 m) che fiancheggia il lato lungo meridionale delle Terme II. Dell'ambiente, si conserva la delimitazione perimetrale data da superfici residue in *Opus vittatum mixtum* e da prevalente muratura in pietre poliedriche.

Inquadramento geologico e materiali costruttivi dei siti archeologici

3.1 Le Piccole Terme ed il Teatro di Nora (Pula, Sardegna, Italia)

La città di Nora è situata sul promontorio di Capo Pula, una penisola di circa 800 m di lunghezza con orientazione NW-SE. I dati cartografici CARG-ISPRA (Cartografia Geologica e Geotematica) indicano che l'area archeologica è inquadrabile nel foglio 566, 565 e 573 scala 1:50.000.

La penisola è caratterizzata da un paesaggio collinare su cui sono presenti due rilievi principali, Sant'Efisio (38 m s.l.m.) posto all'estremità Sud-Est ed il colle Tanit (11 m s.l.m.) situato circa al centro della penisola. Più a Nord del colle Tanit è situato l'ex presidio militare di Nora, oggi quasi completamente dismesso.

I colli Sant'Efisio e Tanit sono due antichi centri di emissione di lave ipoabissali, relativi alla sequenza lavica basica-intermedia inferiore (LBLS) appartenente al primo ciclo vulcanico Oligo-Miocenico (Assorgia 1997, Beccaluva et al. 1985). Tale litologia è identificata col tematismo 19a, in Fig. 3.1.1. Tre quarti dell'area archeologica di Nora sono edificati su affioramenti delle suddette lave mentre nella zona settentrionale, il sito archeologico, è realizzato su sedimenti marini e continentali di età Quaternaria (tematismo 1a, Fig. 3.1.1).

Nei pressi dell'area archeologica, ed in generale nell'agro di Pula, sono diversi i centri di emissione delle suddette lave 19a, (Monte Su Casteddu, Monte Santa Vittoria, Coltellazzo, Monte San Macario ecc.) e presentano altezze comprese fra 20 e 60 m s.l.m.

Nell'entroterra, posti a Nord-Ovest a circa 5 Km di distanza dall'area archeologica, s'innalzano i rilievi della fascia montana di Sarroch-Pula-Domus De Maria caratterizzati da ampi affioramenti leucogranitici (tematismo 31, Fig. 3.1.1) e granodioritici (tematismo 32, Fig. 3.1.1) risalenti al Carbonifero superiore. Si tratta di rilievi con altezza media di circa 300 m s.l.m. con punte sino ad 830 m s.l.m.. In comune di Sarroch i rilievi sono caratterizzati da affioramenti flyshoidi (tematismo 59, Fig. 3.1.1) con alternanze di quarziti, metarenarie e metapeliti risalenti al Carbonifero inferiore.

La penisola di Nora è separata da tali rilievi da una fascia pedemontana con pendenza media di circa 15%, caratterizzata da depositi continentali antichi di età Pleistocenica (Fig. 3.1.1).

Verso l'entroterra, a Nord-Ovest del sito, si possono trovare gli affioramenti della successione carbonatica Devoniana (tematismo 60, Fig. 3.1.1) e della Formazione di Cabitza (tematismo 64, Fig. 3.1.1), costituita anch'essa da metarenarie e metasiltiti di età Ordoviciana media-inferiore. L'agro di Pula e la fascia pedemontana circostante sono, da tempo, luogo di insediamento e di

conseguenza di sfruttamento delle risorse naturali fra cui geo-materiali da costruzione (Garau 2005).

Lo sfruttamento delle risorse geo-materiali dell'area di Nora-Pula ha riguardato l'esplorazione mineraria per l'estrazione di metalli provenienti dalla fascia montana Sarroch-Pula-Domus De Maria e l'estrazione di pietra da costruzione nella zona più prossima al litorale.

Per quanto riguarda l'esplorazione mineraria, già nel XVIII sec. DC si hanno informazioni di estrazione di galena argentifera nella località Perdu Carta, poco a Nord-Ovest di Punta Sa Cresia. Secondo ricostruzioni storico-archeologiche non sarebbe da escludere che Perdu Carta sia stata già area mineraria durante il periodo Romano e Fenicio-Punico (Fadda 1994).

In epoca contemporanea, è noto come nel 1881 in località Sa Galanza (4 km Nord-Ovest di Nora) fosse attiva un'esplorazione della galena argentifera, mentre nelle vicine località di Punta Sa Cresia e Padenteddu si estraevano minerali ferrosi (Billows 1922). Le attività minerarie nella fascia pedemontana di Sarroch-Pula-Domus De Maria sarebbero perdurate sino agli inizi degli anni 60.

La coltivazione di pietra da costruzione è sicuramente già nota nel periodo Romano (Columbu 2018, Previato 2016, Zara 2010) ed ha riguardato l'estrazione di vulcaniti e arenarie dalle zone più prossime alla costa. In particolare, la pietra farebbe la sua comparsa a Nora in ambito edilizio in epoca Tardo-Punica (Pesce 1972). Le rocce vulcaniche estratte (tematismo 19a in Fig. 3.1.1) sono state utilizzate nella realizzazione del Teatro in studio e non solo poiché gran parte dei monumenti di Nora sono edificati con questa pietra.

Si noti come una parte dell'area archeologica, tra cui le Piccole Terme sia invece costruita in arenaria Tirreniana locale utilizzata nella produzione di conci e colonnati. Questa arenaria, costituisce alcuni piccoli affioramenti costieri non cartografati in Fig. 3.1.1 e localizzati in uno scoglio divisorio tra la spiaggia di Sant'Efisio e Su Guventeddu (Nord di Nora). Estesi affioramenti di arenarie Tirreniane si possono ritrovare, inoltre, a Ovest del sito di Nora (Porto D'Agumu), in località Fradis Minoris ed in prossimità di Porto Foxi (tematismo 3b, Fig. 3.1.1).

Nel sito archeologico, altre arenarie appartenenti formazione del Cixerri (Eocene medio), sono state utilizzate sia a livello edilizio, sia per la produzione di manufatti, e in particolare di steli funerarie. Circa le cave di provenienza di queste rocce Finocchi (2003) cita la cava di Sa Perdera localizzata a Nord Ovest di Nora. Lo studioso fa anche alcune considerazioni cronologiche, e osserva che blocchi di arenaria del Cixerri si trovano impiegati in edifici datati al VI sec. AC a testimonianza di un precoce sfruttamento delle cave, come confermato anche dall'utilizzo dell'arenaria per la produzione di steli (Finocchi 2003).

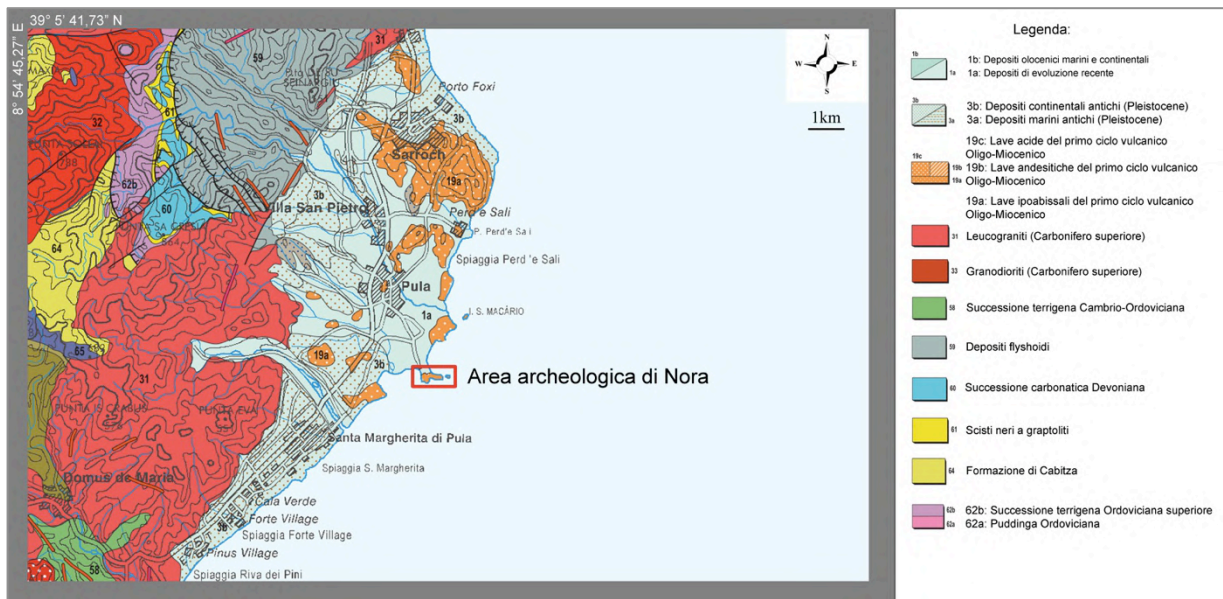


Figura 3.1.1: Carta geologica del sito di Nora e dell'area circostante. Da Carmignani et al. 2015, Geological map of Sardinia (Italy), modificato.

3.2 La Basilica di San Saturnino (Cagliari, Sardegna, Italia)

La Basilica di San Saturnino è situata all'interno dell'area metropolitana di Cagliari. I dati cartografici CARG-ISPRA (Cartografia Geologica e Geotematica) indicano che il monumento è inquadrabile nel foglio 557, scala 1:50.000.

Come visibile da Fig. 3.2.1 l'area di Cagliari è situata all'interno del *Graben* del Campidano di età Plio-Quaternaria (Vardabasso 1962, Casula et al. 2001), limitata lateralmente da pilastri tettonici dei rilievi del Sulcis (Ovest) e del Sarrabus (Est) costituiti in prevalenza da rocce leucogranitiche e granodioritiche del Carbonifero superiore.

La città, realizzata su colli di altezza variabile tra 40 e 110 m s.l.m., si estende anche su zone pianeggianti interessate da depositi di evoluzione recente (tematismo 1a, Fig. 3.2.1). I colli sono rappresentati da affioramenti marini appartenenti al terzo ciclo sedimentario Miocenico (Barroccu et al. 1981, Fig. 3.2.1, tematismo 8). Tali depositi consistono in una stratigrafia che dal basso verso l'alto, presenta le seguenti formazioni: pietra Cantone (biomicrite), tramezzario (calcarenite) e pietra Forte (biolitite). Altri affioramenti nell'area metropolitana di Cagliari consistono in depositi continentali appartenenti al terzo ciclo sedimentario Miocenico (tematismo 9, Fig. 3.2.1, formazione delle arenarie di Pirri) che stratigraficamente occupa una posizione ancora inferiore rispetto alla pietra Cantone. Altri affioramenti nell'area di Cagliari consistono in depositi continentali antichi risalenti al periodo Pleistocenico (tematismo 3b, Fig. 3.2.1) localizzati nell'area Est dell'agglomerato urbano e depositi marini del secondo ciclo sedimentario Miocenico (tematismo 11b, Fig. 3.2.1).

La città storica di Cagliari è stata realizzata in gran parte con le litologie Mioceniche pietra Cantone, tramezzario e pietra Forte. In particolare la prima, probabilmente la più utilizzata, deve suo nome probabilmente dal fatto che veniva largamente impiegata nella realizzazione degli spigoli degli edifici, detti, appunto, cantoni (Grillo 2009). Largamente impiegata nell'edilizia diffusa tradizionale, in particolare del ceto medio-basso, la pietra Cantone, essendo facilmente lavorabile non necessitava di maestranze particolarmente specializzate e quindi economicamente più impegnative, poteva inoltre sostituire i mattoni in fango (*Ladini*).

A Cagliari, la pietra Cantone è erroneamente chiamata "tufo" per via della cattiva traduzione dal sardo "tuvu" (prefisso presente nel nome di alcuni dei colli cagliaritari, Tuvumannu e Tuvixeddu) che significa "caverna" (Grillo 2009). La pietra Cantone è stata utilizzata nella costruzione della Basilica di San Saturnino dove rappresenta circa il 50% del materiale lapideo dell'edificio. Nella Basilica era impiegata per la realizzazione di strutture murarie la cui superficie veniva poi protetta mediante uno strato di intonaco di calce.

Se non protetta, infatti, la pietra Cantone si degrada facilmente, in quanto è fortemente suscettibile all'azione di numerosi agenti naturali che determinano l'insorgere di fenomeni patologici.

Nella Basilica di San Saturnino, il restante 50% di materiale da costruzione è rappresentato dalla pietra Forte e dal tramezzario, che appartenenti alla stessa serie deposizionale, sono però caratterizzati da resistenze meccaniche più elevate rispetto alla pietra Cantone.

La pietra Forte, infatti, era utilizzata nella realizzazione di strutture murarie portanti ed a differenza della pietra Cantone non necessita di particolari accorgimenti protettivi. Per le sue caratteristiche fisico-meccaniche, infatti, non è facilmente oggetto di degrado naturale, se non per fenomeni legati all'alterazione cromatica.

Nell'area metropolitana di Cagliari la pietra calcarea (Cantone, tramezzario e Forte) è sicuramente già coltivata in periodo Tardo Repubblicano (Coroneo 1993, Previato 2016) come per altro dimostra la stessa Basilica di San Saturnino. Le cave storiche si trovano nel colle del Buoncammino, nell'area dell'anfiteatro e sulle colline di Tuvixeddu, Tuvumannu e colle Bonaria. Al loro interno però, la lettura delle tracce di estrazione d'epoca antica è spesso ostacolata o compromessa dallo sfruttamento cui andarono soggette anche in epoche successive nonché dalla diffusa presenza di cumuli di detriti di cava (Bordicchia 2007).

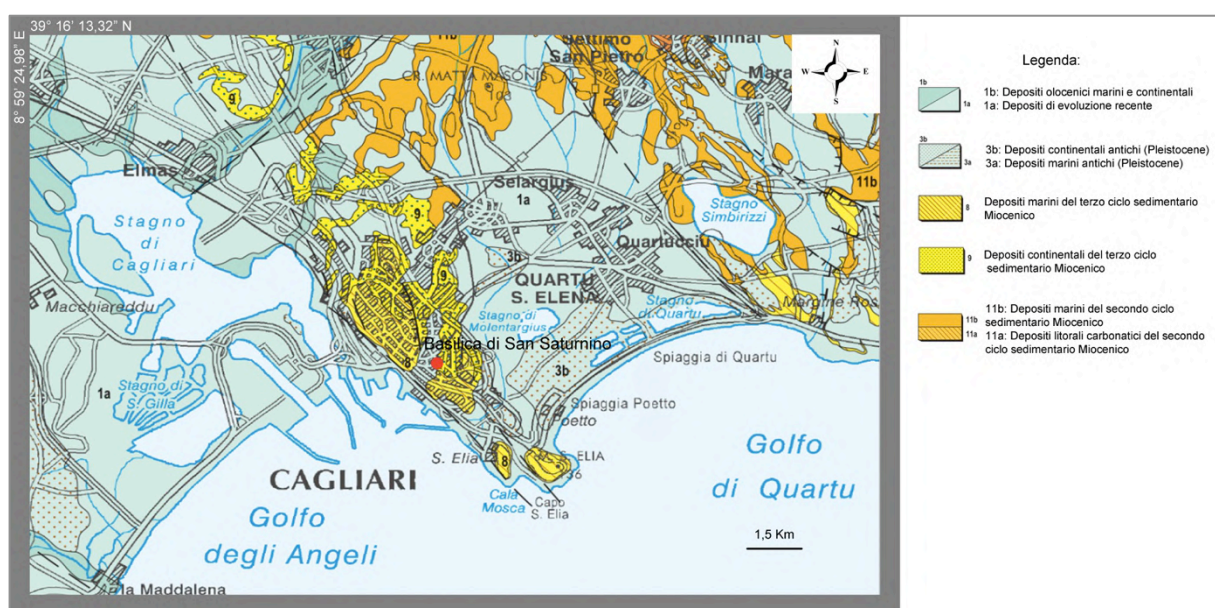


Figura 3.2.1: Carta geologica dell'area di Cagliari da Carmignani et al. (2015) Geological map of Sardinia (Italy), modificato.

In periodo Romano l'estrazione avveniva mediante l'incisione di un solco orizzontale e due solchi verticali in modo da poter estrarre blocchi squadrati. Anche nei secoli successivi al periodo Romano l'estrazione della pietra calcarea continuò sino a raggiungere un primo apice nei sec. XIV-XV AD. Un secondo apice si ebbe negli anni sessanta e settanta, dove la coltivazione avveniva nell'area di

Tuvixeddu-Is Mirrionis (cava Catino, Cagliari) mediante tecnica di coltivazione ad imbuto, e nell'area di Monte Urpinu.

Sebbene i geo-materiali utilizzati nella costruzione della Basilica riflettano la geologia della zona di ubicazione del monumento, questo è in piccolissima parte realizzato con litologie estranee al contesto geologico dell'area di Cagliari (e.g. marmi e vulcaniti). Il marmo a San Saturnino è utilizzato come materiale per la realizzazione dei colonnati interni ed esterni e qualche volta costituisce conci lavorati utilizzati nelle pareti interne. Analogamente al marmo, conci di pietra vulcanica non provenienti dall'area di Cagliari sono stati utilizzati nell'abside col fine di realizzare un'alternanza di conci calcarei di colore chiaro e nero (*Bicromia*).

3.3 Il lastricato del *Cardo* e le Terme II (Grandi Terme) di Tharros (Cabras, Sardegna, Italia)

La città di Tharros è situata sul promontorio di capo San Marco che geograficamente, è una penisola (*Sinis*) di circa 2,8 Km di lunghezza con orientazione N-S. I dati cartografici CARG-ISPRA (Cartografia Geologica e Geotematica) indicano che l'area è inquadrabile nel foglio 528 in scala 1:50.000.

La penisola è caratterizzata da rilievi di altezza massima di circa 50 m s.l.m. e geologicamente consiste in affioramenti di roccia basaltica calco-alcalina Plio-Pleistocenica (tematismo 4b, Fig 3.3.1) utilizzati per la realizzazione della città storica fra cui parte degli edifici e le intere strade.

Gli affioramenti basaltici del *Sinis* posti a quote intorno ai 40-50 m s.l.m., giacciono sui calcari marini laminati del *Sinis* appartenenti al terzo ciclo sedimentario Miocenico (Fig. 3.3.1, tematismo 8) anch'essi affioranti nella penisola.

Ad Est della penisola, nella piana di Oristano, si assiste ad un contesto monotono dal punto di vista geologico, caratterizzato da sedimenti Olocenici marini e continentali (tematismi 1a, 1b, Fig. 3.3.1) e da depositi anch'essi continentali ma di età più antica, databili al Pleistocene (tematismo 3b, Fig. 3.3.1). Anche nel caso dell'area archeologica di Tharros, i geo-materiali di costruzione di edifici e rete viaria riflettono la geologia dell'area di ubicazione del sito.

L'intera città è edificata con litologie vulcaniche Plio-Pleistoceniche ed arenarie di epoca Tirreniana.

Il basalto era utilizzato nella realizzazione di conci, elementi architettonici portanti e nella realizzazione della pavimentazione della rete viaria del sito (*Cardi e Decumani*).

L'arenaria era utilizzata nella realizzazione di strutture ed oggetti di modeste dimensioni quali capitelli, basamenti, tettoie e canalette di reti fognarie.

Nella penisola del *Sinis* l'attività di coltivazione di queste litologie è di incerta datazione ma è possibile ipotizzare, almeno per una parte delle cave, una estrazione a partire dall'età antica.

Numerose sono infatti le cave di arenaria Tirreniana locale (Tematismo 3b, Figura 3.3.1) situate principalmente sul litorale a Nord-Ovest del sito.

Alcune cave sono localizzate a brevissima distanza dalla costa per l'economicità del trasporto via mare, a fronte delle difficoltà del trasporto terrestre per la mancanza, fino ad età recente, di strade percorribili. Tra le cave più importanti di arenaria possono ricordarsi la cosiddetta "Sala da ballo", ubicata a Nord di S. Giovanni di *Sinis*, la cava di Punta Maimoni, quelle di Corrigias, Su Crastu Biancu, Is Aruttas, e Su Bardoni e Muras. Altre si trovano invece più all'interno, in aree di vasti affioramenti rocciosi come nelle località di Sa Pedrera e Procaxius (Acquaro & Finzi 1999).

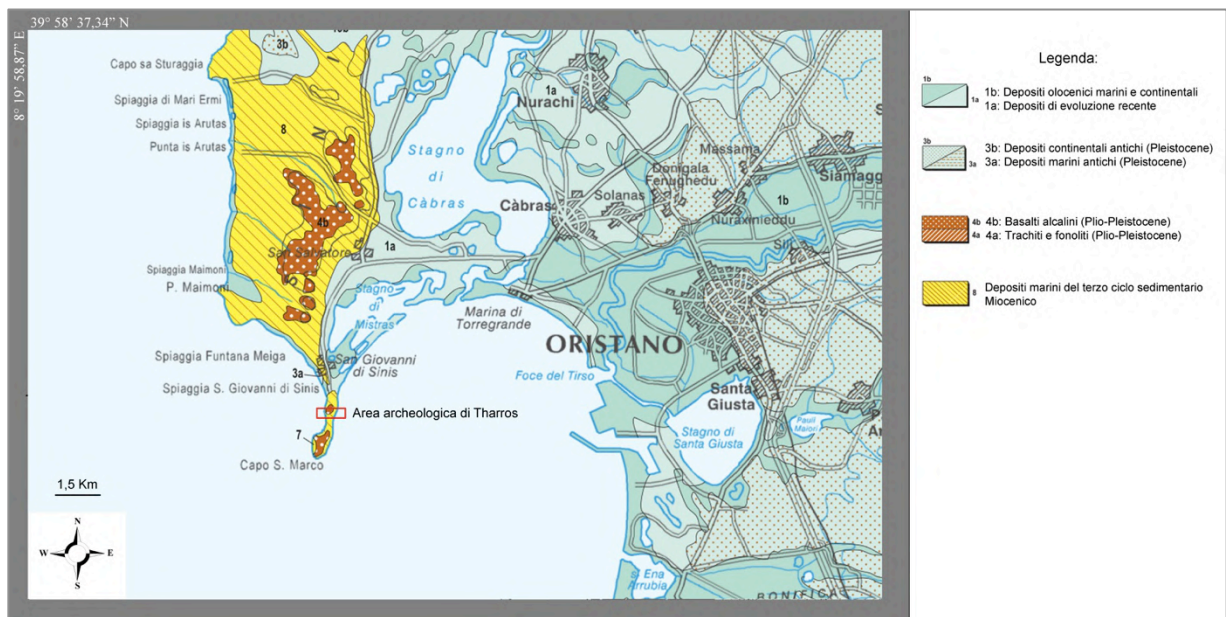


Figura 3.3.1: Carta geologica dell'area di Tharros (Penisola del Sinis) da Carmignani et al. (2015) Geological map of Sardinia (Italy), modificato.

Le tracce di lavorazione ancora visibili in cava documentano la tecnica estrattiva utilizzata, comune ad altri giacimenti antichi: l'attività prevedeva l'escavazione, con l'uso di picconi metallici, di solchi larghi dai 5 ai 15 cm circa, progressivamente più stretti verso il basso e a sezione a V o a U, che consentivano di delimitare dei blocchi, anche di dimensioni considerevoli, liberandoli sulle facce laterali; il distacco della faccia inferiore avveniva tramite l'utilizzo di cunei, in metallo e forse anche in legno, conficcati profondamente nella roccia con l'ausilio di pesanti mazze (Acquaro & Finzi 1999). L'asportazione progressiva dei blocchi creava dei fronti di cava da cui si partiva per la successiva estrazione, sia in profondità sia in estensione (Del Vais & Sebis 2010).

Oltre all'estrazione di arenaria Tirreniana si assiste al prelievo di basalto (identificato dal tematismo 4b, Fig. 3.3.1) probabilmente in massi erratici derivanti dalle falde del Monte San Marco, posto a Ovest del sito archeologico e distante solo 100 m. E' del tutto probabile che il basalto per la costruzione dell'area archeologica ed in particolare dei *Cardi* e *Decumani* fosse estratto nella zona Nord dello stesso sito, in cui un ampio sbancamento per la costruzione del *Tofet* potrebbe essere servito anche per attività di cava.

3.4 Il Forum Traiani (Fordongianus, Sardegna, Italia)

Il Forum Traiani è situato lungo la riva sinistra del fiume Tirso, in corrispondenza del tratto che attraversa la sub-regione storica del Barigadu (Sardegna Centro-Occidentale).

I dati cartografici CARG-ISPRA (Cartografia Geologica e Geotematica) indicano che l'area è inquadrabile nel foglio 529 in scala 1:50.000.

La zona di Fordongianus rappresenta un territorio abbastanza complesso dal punto di vista geologico (Fig. 3.4.1).

Poco a Nord del centro abitato e del sito del Forum Traiani si trovano estesi espandimenti di basalti alcalini Plio-Pleistocenici (tematismo 4b, Fig. 3.4.1) posti alla sommità di un plateau con elevazione circa 200 m s.l.m.

A Sud-Ovest del sito, oltre il Monte Grighini, si estende la pianura Oristanese con quote medie intorno a 20-30 m s.l.m. che è interessata da depositi Olocenici marini (1b) e continentali, e depositi continentali antichi risalenti al Pleistocene (tematismo 3b, Fig. 3.4.1).

Nella zona Est dell'area in esame si estende un vasto affioramento di piroclastiti relative al primo ciclo vulcanico Oligo-Miocenico (tematismo 18, Fig. 3.4.1). Si tratta di un'imponente attività vulcanica con prodotti piroclastici a saldatura da debole ad elevata utilizzati per la costruzione di gran parte del centro abitato di Fordongianus e del Forum Traiani.

Non è noto il periodo esatto in cui la coltivazione della pietra piroclastica ha avuto inizio tuttavia, a testimonianza delle attività estrattive in epoca storica, alcuni piccoli loculi estrattivi sono presenti all'interno del Forum Traiani, (area delle Terme I) datata storicamente al Tardo Romano Impero (Serra & Bacco 2014).

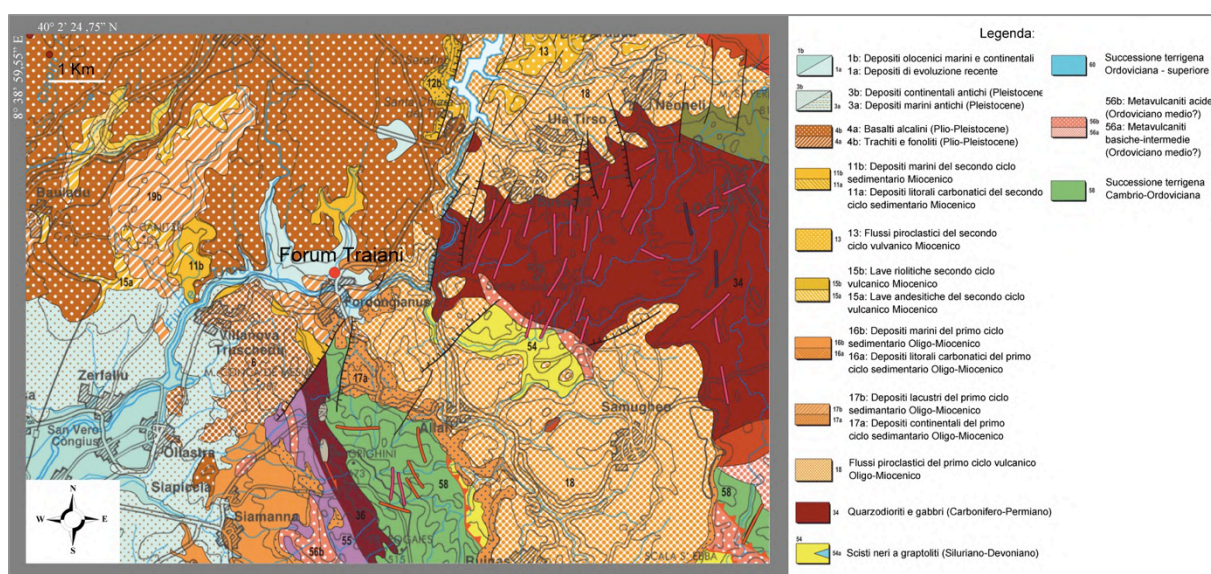


Figura 3.4.1: Carta geologica dell'area di Forum Traiani, da Carmignani et al. (2015) Geological map of Sardinia (Italy), modificato.

La coltivazione d'ignimbrite nell'area di Fordongianus, è documentata in epoca Medioevale e post con la costruzione della chiesa Romanica di San Lussorio (XII sec. DC) e nella realizzazione della Casa Aragonese (XVI sec. DC).

Le cave ancora attive di questo litotipo sono tre, oggi di proprietà Deledda, Mura e Frau.

Contesto climatico delle aree dei siti archeologici

4.1 Il clima dell'area Mediterranea

Il clima Mediterraneo, (Cs) secondo la classificazione climatica di Köppen (1931), è il meno esteso dei climi temperati. È caratterizzato da un lungo periodo di siccità estiva ed inverni piovosi con temperature miti. Il mar Mediterraneo gioca un ruolo cruciale in questo tipo di clima e può essere considerato come una fascia di transizione tra le zone tropicali, dove le stagioni sono definite in accordo alla quantità di pioggia, e le zone temperate, dove le stagioni sono caratterizzate da nette variazioni di temperatura. Di conseguenza si ha a che fare con grandi variazioni stagionali di precipitazioni, accompagnate da variazioni di temperatura, senza che però le une le altre raggiungano i valori estremi tipici delle due aree climatiche end-members (Critchfield 1983, Martyn 1992).

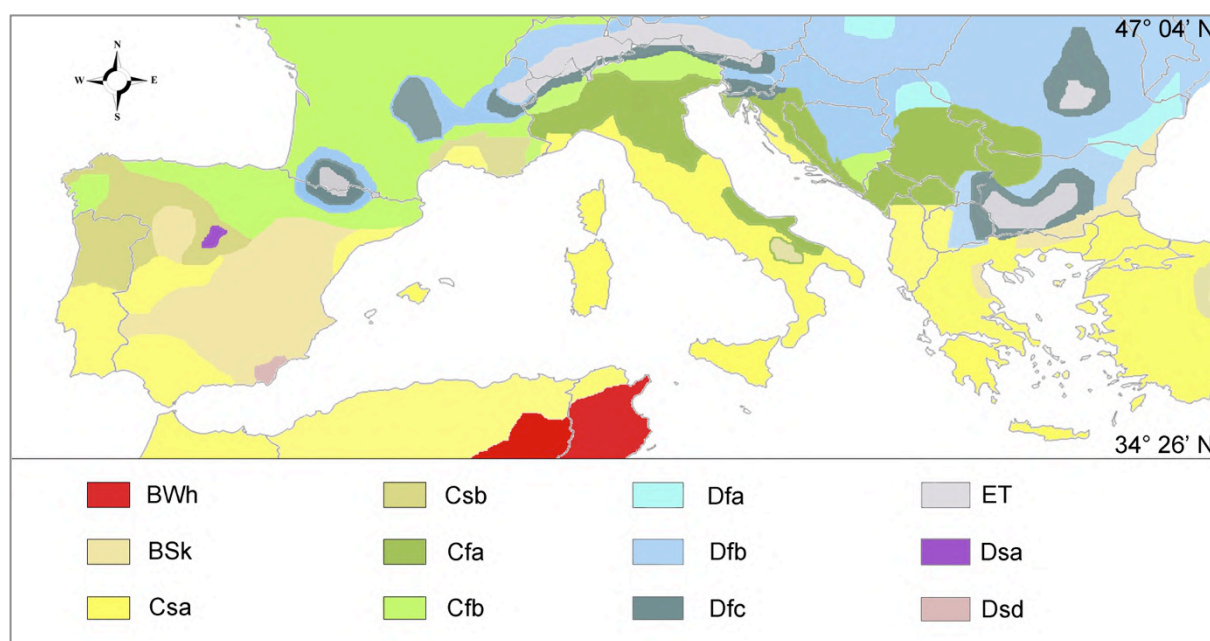


Figura 4.1.1: Climi dell'area Mediterranea; Università di Melbourne, modificato: BWh = desertico caldo, BSk = steppico, Csa = Mediterraneo ad estate calda, Csb = Mediterraneo ad estate tiepida, Cfa = temperato umido con estate calda, Cfb = temperato umido con estate tiepida, Dfa = continentale senza stagione secca ed estate calda, Dfb = continentale senza stagione secca ed estate tiepida, Dfc = subpolare, ET = tundra, Dsa = mediterraneo continentale, Dsd = continentale caldo.

Nell'area Mediterranea (Fig. 4.1.1), la principale causa delle notevoli differenze climatiche fra le stagioni è la migrazione verso Nord delle celle di alta pressione subtropicali settentrionali (Peixoto 1992, Barry & Charney 1983). D'estate, infatti, tali celle arrivano ad interessare tutto il bacino del Mediterraneo, dando vita ad una zona di forte stabilità atmosferica (che nei mesi di Giugno, Luglio

e Agosto può dare origine ad un regime tipicamente subtropicale arido), favorendo situazioni di cielo sereno con temperature massime elevate, anche se accompagnate da escursioni termiche di discreta entità. D'inverno invece le medesime celle restano confinate al Nord-Africa e lasciano il Mediterraneo esposto a flussi di aria umida di provenienza atlantica o di aria fredda di provenienza polare soprattutto dai quadranti N-O (Fulvi 1996).

Un'altra particolarità del clima Mediterraneo è legata fortemente alla presenza e disposizione di sistemi orografici di grande estensione, oltre che al mare stesso. Questo permette di avere a che fare con un mare chiuso relativamente poco profondo che smorza gli eccessi di temperatura meno di quanto facciano gli Oceani Atlantico e Pacifico a latitudini analoghe, e allo stesso tempo protegge parzialmente dalle intense perturbazioni tipiche di altre aree del pianeta poste alle medesime latitudini, ma in zone continentali o lambite dagli oceani (Strahler 1993).

Riguardo al clima Mediterraneo, occorre inoltre ricordare che la presenza delle catene montuose che lo circondano implica un aumento dell'attività ciclonica nel bacino stesso. È da precisare come il clima Mediterraneo non risulta confinato solo al suddetto bacino ma è presente, a latitudini analoghe Nord e Sud, negli stati Uniti Occidentali, in Sud America e nelle coste meridionali Africane. Zone interessate da clima Mediterraneo sono inoltre localizzate nelle coste SW del continente Australiano.

4.2 Il clima in Sardegna e nelle aree dei siti archeologici

Come visibile da Fig. 4.1.1 la Sardegna, posta al centro del mar Mediterraneo, risulta interessata da un clima Mediterraneo caratterizzato da estati calde (tematismo Csa).

Secondo Pinna (1978), lungo le zone costiere dell'isola si hanno inverni miti mentre le estati sono calde e secche, caratterizzate da una notevole ventilazione. Le brezze marine e la costante ventilazione permettono di sopportare le elevate temperature estive che superano normalmente i 30 °C e raggiungono anche i 35 °C. Nelle zone interne pianeggianti e collinari, a causa della maggior lontananza dal mare, si registrano temperature invernali più basse ed estive più alte rispetto alle aree costiere. Il clima è nel complesso abbastanza mite, ma durante l'arco dell'anno si possono avere valori minimi invernali di alcuni gradi sotto zero e massimi estivi anche superiori ai 40 °C. Appare evidente come all'interno dell'isola quindi possano sussistere dei sotto-climi derivanti principalmente dall'effetto quota.

Nel 2014, Canu et al. realizzano una accurata mappa dei sotto-climi in Sardegna con una affinità prettamente bioclimatica, realizzata con l'ausilio di 203 stazioni pluviometriche e 68 stazioni termometriche sparse per l'isola.

La stesura finale della carta bioclimatica è data dall'overlay di quattro indici bioclimatici quali macrobioclimi, termotipi, indici ombrotermici ed indici di continentalità (Canu et al. 2014).

In base alla carta, in Sardegna sono presenti 3 macrobioclimi classificati come Mediterraneo pluvio-stagionale oceanico, oceanico temperato a variante sub-mediterranea e temperato oceanico. All'interno di questi 3 macrobioclimi sono presenti un numero totale di 43 isobioclimi.

Geo-referenziando i punti d'ubicazione dei monumenti in studio sulla mappa di Canu, si nota come tutti i siti ricadano all'interno del macrobioclima Mediterraneo pluvio-stagionale oceanico, ma in isobioclimi differenti (Fig. 4.2.1).

La Basilica di San Saturnino e l'area archeologica di Nora rientrano all'interno dell'isobioclima termomediterraneo inferiore, secco inferiore, fortemente euoceanico (Fig. 4.2.1a, b, tematismo 2).

Nell'area di Tharros si assiste invece ad un clima termomediterraneo superiore, secco inferiore, debolmente euoceanico (Fig. 4.2.1c, tematismo 6).

Il sito archeologico di Forum Traiani è invece localizzato in una zona di contatto tra l'isobioclima termomediterraneo superiore, secco inferiore, debolmente euoceanico (tematismo 6, Fig. 4.2.1d) e mesomediterraneo inferiore, sub-umido inferiore a carattere debolmente euoceanico (tematismo 14, Fig. 4.2.1d).

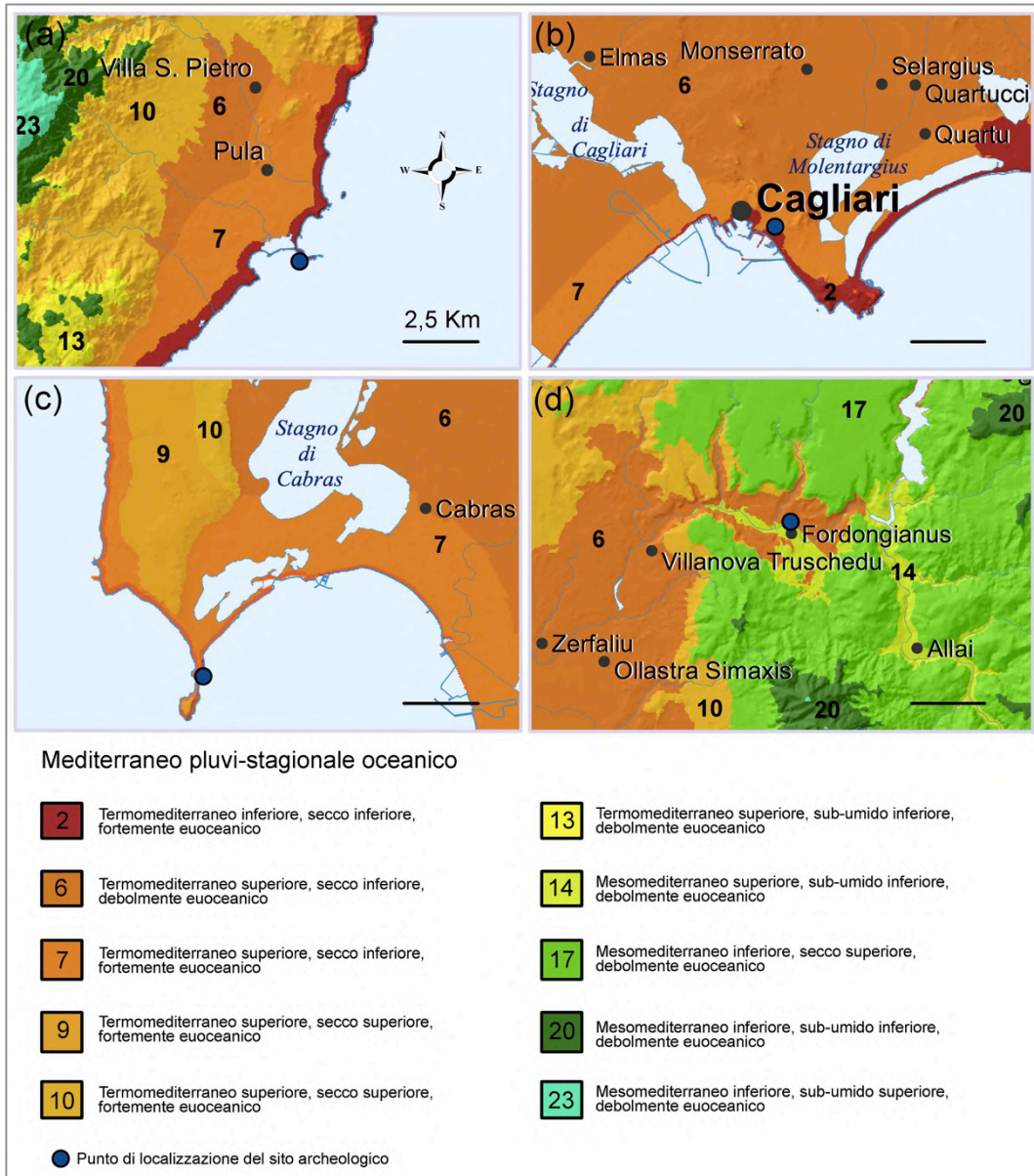


Figura 4.2.1: Carte bioclimatiche delle aree relative ai siti archeologici di interesse, da Canu et al. 2014, modificato. (a) area archeologica di Nora, (b) Basilica di San Saturnino, (c) penisola del *Sinis* ed area archeologica di Tharros, (d) area di Fordongianus-Forum Traiani.

4.3 I parametri ambientali: temperatura, umidità, pioggia, vento, eliofania e radiazione solare

Le caratteristiche climatiche dei luoghi di localizzazione dei monumenti, ripetiamo, tutte all'interno del macrobioclima Mediterraneo pluvio-stagionale oceanico, appartengono a diversi isobioclimi i quali, molto simili fra loro, differiscono molto debolmente per quanto riguarda i dati di temperatura, umidità, piovosità, vento, eliofania e radiazione solare. Queste leggere differenze si possono notare nelle raccolte dati del trentennio di riferimento 1971-2000 relativi alle 20 stazioni meteorologiche della Sardegna. Sparse per tutto il territorio isolano, le stazioni meteorologiche di riferimento sono, alcune di proprietà dell'Ente Nazionale per l'Assistenza al Volo (ENAV) ed altre proprietà dell'aeronautica militare Italiana (AM).

I dati del trentennio di riferimento 1971-2000 per tutte le stazioni meteorologiche Sarde sono disponibili sui portali ARPAS (Agenzia Regionale Protezione Ambiente regione Sardegna) ed AM (Aeronautica Militare, atlante climatico d'Italia). Il nostro interesse ricade sulle stazioni meteorologiche di Cagliari-Elmas e di Capo Frasca sulla base della loro vicinanza ai monumenti in studio (Fig. 4.3.1a, b).

La stazione di Cagliari-Elmas, situata all'aeroporto militare di Elmas, dista 28 Km NN-E rispetto all'area archeologica di Nora e 6 Km N-W rispetto alla Basilica di San Saturnino. La stazione ricade, come da carta bioclimatica, all'interno del tematismo 6 (Fig. 4.3.1b).

La stazione di Capo Frasca (Arbus), è situata a soli 11 Km Sud dell'area archeologica di Tharros e circa 40 Km S-O dal sito di Forum Traiani e ricade nell'isobioclima termomediterraneo superiore, asciutto superiore, fortemente euoceanico (tematismo 9, Fig. 4.3.1a).

Le differenze d'isobioclima tra stazioni meteorologiche e monumenti come quest'ultimo caso o come quello tra la stazione meteorologica di Cagliari-Elmas e le aree di Nora, San Saturnino sono piuttosto esigue (Fig. 4.3.1).

In questo senso, è consentito applicare ai siti archeologici di Nora e San Saturnino gli stessi dati climatici di trentennio rilevati nella stazione meteorologica di Cagliari-Elmas ed applicare ai siti di Forum Traiani e Tharros i dati relativi alla stazione meteorologica di Capo Frasca incorrendo in differenze assolutamente trascurabili.

I dati relativi al trentennio 1971-2000 per la stazione di Cagliari-Elmas e Capo Frasca sono riportati nelle Tab. 4.3.1 e 4.3.2.

La stazione di Cagliari-Elmas (Tab. 4.3.1), registra una temperatura massima media annuale di 21,7 °C ed una minima media annuale di 11,8 °C. Le temperature massime medie più elevate si registrano nei mesi estivi (29,5 °C) mentre nei mesi invernali si assiste a valori di 14,8 °C. Le temperature minime medie invece sono di 18,2 °C nel periodo estivo e 6 °C nel periodo invernale.

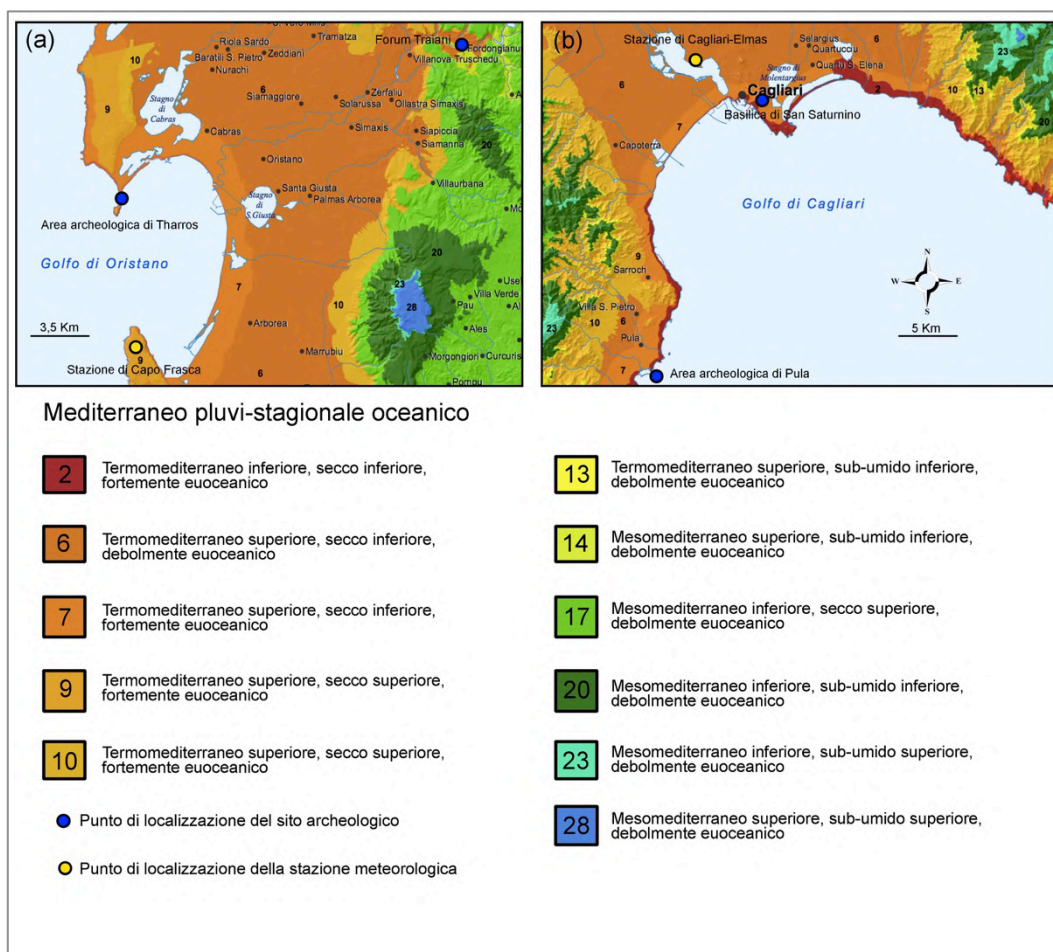


Figura 4.3.1: Carte bioclimatiche delle aree relative alle stazioni meteorologiche ed ai monumenti, da Canu et al. 2014, modificato.
 (a) stazione di Capo Frasca, proprietà AM, localizzazione 39°44'52.32"N, 8°27'24.99"E, Z = 92 m s.l.m., Comune di Arbus,
 (b) stazione di Cagliari-Elmas, proprietà ENAV, localizzazione 39°14'36.14"N, 9°03'36.78"E, Z = 1 m s.l.m., Comune di Elmas.

Il record di temperatura massima assoluta è stato rilevato nell'Agosto 1983 con + 43,5 °C mentre il record di temperatura minima assoluta è registrato in Gennaio 1981 con - 4,8 °C.

I giorni di calura media annuale registrati nel trentennio con $T \geq 30$ °C sono in totale 46,1 e sono concentrati nei periodi estivi con una media di 5,3 in Giugno 16,5 in Luglio, 19,2 in Agosto e 5,1 in Settembre.

Il numero di giorni di gelo annuali ($T \leq 0$ °C) sono piuttosto esigui (4 in totale) e sono concentrati nei mesi Novembre, Dicembre, Gennaio, Febbraio, Marzo ed Aprile (Tab. 4.3.1).

Sempre in Tab. 4.3.1 è mostrato come l'umidità relativa dell'aria raggiunga una media di 72,9% annuo mentre risulta particolarmente elevata nella stagione estiva con valore di 78,3%. Nelle stagioni intermedie quali primavera ed autunno l'umidità relativa è pari a 72,3 e 75% rispettivamente mentre il valore più basso è registrato nei medi estivi con 66%.

Le precipitazioni dell'area di Cagliari-Elmas riflettono il trend relativo ad un clima di tipo Mediterraneo. Si osserva la presenza di due stagioni principali: una nel periodo che va da Ottobre

ad Aprile, e l'altra che si estende da Maggio a Settembre. Il passaggio fra le due stagioni è particolarmente marcato fra Settembre ed Ottobre, in corrispondenza del quale si hanno differenze di circa 18 mm. Il massimo cumulato di precipitazione si ha in Novembre con 58,4 mm distribuiti in 7 giorni di pioggia mensile. Rilevante è anche l'accumulato nei mesi di Ottobre, Dicembre, Gennaio e Febbraio. Il minimo accumulato di precipitazione è invece registrato in estate nel mese di Luglio con soli 4,1 mm.

Come da Tab. 4.3.1 i giorni di nebbia nell'area di rilievo sono piuttosto esigui con una media di 9 giorni nel periodo invernale, 5 giorni nel periodo primaverile, 1 giorno estivo e 5 giorni autunnali.

L'umidità della zona è particolarmente elevata, ed è dovuta in alla presenza del mare distante solo pochi Km e dalla presenza di aree umide quali il vicino stagno di Santa Gilla.

Nella zona, il vento ha una velocità media variabile tra 15,3 e 16 Km/h con valori stagionali piuttosto simili; la media annuale è di 15,3 Km/h corrispondenti, secondo la scala Beaufort, ad una brezza tesa (Casati & Pace 1996). Nell'area di Cagliari-Elmas, come da Tab. 4.3.3 è stata registrata la frequenza percentuale di ogni tipo di vento Mediterraneo nel trentennio di analisi 1971-2000. Nel resoconto, il Maestrone rappresenta il 27,69% del vento totale. Elevati sono anche i valori relativi al Ponente (15,91%) ed alla Tramontana (13,54%). Questi venti spesso rappresentano non tanto un vento puro ma piuttosto direzioni variabili di folate di Maestrone (vortici).

Per quanto riguarda i venti provenienti dai quadranti Meridionali si registra una frequenza di Scirocco pari a 15,81% considerato come vento secondario. È importante sottolineare che i dati di Tab. 4.3.3 siano in realtà applicabili a tutte le zone della Sardegna.

Direzione di provenienza								
N	N-E	E	S-E	S	S-W	W	N-W	Variabile, calma di vento
Tramontana	Grecale	Levante	Scirocco	Mezzogiorno	Libeccio	Ponente	Maestrone	
13,54%	2,41%	6,99%	15,81%	11,43%	6,04%	15,91%	27,69%	0,20%

Tabella 4.3.3: Direzione e frequenza percentuale dei venti nella zona di Cagliari-Elmas ed in tutta la Sardegna. Dati ARPAS ed AM.

L'eliofania, grandezza influenzata da due soli fattori quali la lunghezza del dì (inteso come numero di ore comprese fra l'alba e il tramonto) e la copertura nuvolosa è anch'essa mostrata in Tab. 4.3.1.

Com'è ben noto la lunghezza del giorno varia con continuità nell'arco dell'anno, senza apprezzabili distinzioni fra le diverse aree della Sardegna; mentre la copertura nuvolosa, pur essendo diversa da zona a zona nel breve periodo, è essenzialmente legata a fenomeni a grande scala che influenzano in media la regione in modo sostanzialmente uniforme.

Da Tab. 4.3.1, si nota subito che benché la massima eliofania sia attesa per il Giugno da un punto di

vista astronomico, nella realtà il valore massimo si osserva in Luglio (11 h/g), ciò indicando una copertura nuvolosa media notevolmente minore durante questo mese. È inoltre naturale come il numero di ore solari giornaliere sia massimo nel periodo estivo 10,6 h/g e minimo nel periodo invernale con solo 4,9 h/g. Anche in questo caso si nota come le stagioni intermedie quali primavera (7,6 h/g) ed autunno (6,6 h/g) presentano valori intermedi di eliofania compresi tra i due end-members estivi ed invernali.

La radiazione solare globale nell'area di Cagliari-Elmas come rilevato da database AM e da Lavaglini et al. 1987, è pari a circa 196 MJ/m² anno con estremi in Dicembre (7 MJ/m²) e Luglio (27 MJ/m²). La media mensile di radiazione solare globale è quindi pari a 196 MJ/m²/12 = ≈16 MJ/m². Tali dati sono forniti con una media di misurazioni effettuata nel periodo tra il 1994 ed il 2016.

Cagliari-Elmas (applicabile a Nora e San Saturnino)	Mesi												Stagioni				Anno
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Inv	Pri	Est	Aut	
(1971-2000)																	
T. max. media (°C)	14,3	14,8	16,5	18,6	22,9	27,3	30,4	30,8	27,4	23,1	18,3	15,4	14,8	19,3	29,5	22,9	21,7
T. min. media (°C)	5,5	5,8	7,1	8,9	12,4	16,2	18,9	19,6	17,1	13,7	9,3	6,6	6	9,5	18,2	13,4	11,8
T. max. assoluta (°C)	20,2	22,1	24,5	26,6	34,4	38,6	43,6	41,4	35	31,8	25,2	23,2	23,2	34,4	43,6	35	43,6
	1979	1978	1989	1985	1997	1982	1983	1999	1987	1999	1987	1989					
T. min. assoluta (°C)	-4,8	-3,0	-2,2	-0,4	4,8	8,8	12,2	12,6	9,6	5	-2,0	-3,4	-4,8	-2,2	8,8	-2,0	-4,8
	1981	1999	1998	1995	1987	1986	1991	1981	1984	1974	1998	1996					
Giorni di calura (T _{max} ≥ 30 °C)	0	0	0	0	0	5,3	16,5	19,2	5,1	0	0	0	0	0	41	5,1	46,1
Giorni di gelo (T _{min} ≤ 0 °C)	1,8	0,8	0,4	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1	0,8	3,4	0,5	0	0,1	4
Precipitazioni (mm)	49,7	53,3	40,4	39,7	26,1	11,9	4,1	7,5	34,9	52,6	58,4	48,9	151,9	106,2	23,5	145,9	427,5
Giorni di pioggia	7	7	7	7	4	2	1	1	4	7	7	7	21	18	4	18	61
Giorni di nebbia	3	3	2	1	2	0	1	0	1	2	2	3	9	5	1	5	20
Umidità relativa media (%)	79	76	74	72	71	67	65	66	70	76	79	80	78,3	72,3	66	75	72,9
Eliofania assoluta (h/g)	4,8	5,8	6,7	7,3	8,7	10,4	11	10,3	8,1	6,7	5	4,1	4,9	7,6	10,6	6,6	7,4
Vento (km/h)	16	16	15	15	15	15	15	15	16	16	16	16	16	15	15,3	16	15,3

Tabella 4.3.1: Dati climatici del trentennio 1971-2000 per la stazione meteorologica di Cagliari-Elmas (atlante climatico d'Italia).
Stazione di proprietà ENAV, localizzazione 39°14'36.14"N, 9°03'36.78"E, Z = 1 m s.l.m., Comune di Elmas.

La stazione meteo di Capo Frasca (Tab. 4.3.2), registra una temperatura massima media annuale di 19,9 °C ed una minima media annuale di 13,4 °C. Le temperature massime medie più elevate si

registrano nei mesi estivi (27 °C), mentre nei mesi invernali si assiste a valori di 13,6 °C. Le temperature minime medie invece sono di 19,5 °C nel periodo estivo e 8 °C nel periodo invernale. Il record di temperatura massima assoluta è stato rilevato nell'Agosto 1999 con + 41,6 °C mentre il record di temperatura minima assoluta è registrato in Gennaio 1981 con - 4,8 °C. I giorni di calura media annuale registrati nel trentennio con $T \geq 30$ °C sono in totale 21 e sono concentrati nei periodi estivi con una media di 3 in Giugno 7 in Luglio, 8 in Agosto e 3 in Settembre.

L'umidità della zona è particolarmente elevata, ed è dovuta alla presenza del mare distante solo poche decine di metri. In Tab. 4.3.2 è mostrato come l'umidità relativa dell'aria raggiunga una media di 81% annuo mentre risulta particolarmente elevata nella stagione invernale con 84,3%. Nelle stagioni intermedie quali primavera ed autunno l'umidità relativa è pari a 81,3 e 80,7% rispettivamente mentre il valore più basso è registrato nei mesi estivi con 78%.

Anche a Capo Frasca le precipitazioni riflettono il trend relativo ad un clima di tipo Mediterraneo. Analogamente all'area di Cagliari-Elmas, si osserva la presenza di due stagioni principali: una relativa al periodo che va da Ottobre ad Aprile, e l'altra che si estende da Maggio a Settembre. Il passaggio fra le due stagioni è particolarmente marcato fra Settembre ed Ottobre, in corrispondenza del quale si hanno differenze di 35,5 mm, valore elevato rispetto ai 17,7 mm di Cagliari-Elmas. Il massimo cumulato di precipitazione è anche in questo caso in Novembre con 92,5 mm distribuiti in 10 giorni di pioggia mensile. Rilevante è anche l'accumulato nei mesi di Ottobre (69,7 mm su 8 giorni di pioggia), Dicembre (65 mm su 9 giorni di pioggia), Gennaio (50 mm su 8 giorni di pioggia) e Febbraio (60,5 mm su 8 giorni di pioggia).

Il minimo accumulato di precipitazione è invece registrato in estate nel mese di Luglio con soli 4,4 mm di lama d'acqua.

Come da Tab. 4.3.2 i giorni di nebbia nell'area sono piuttosto esigui con una media di 3 giorni nel periodo invernale, 3 giorni nel periodo primaverile, 2 giorno estivo e 2 giorni autunnali.

Nella zona, il vento ha una velocità variabile tra 15 e 16 Km/h con valori stagionali piuttosto simili; la media annuale è di 15,5 Km/h corrispondenti, secondo la scala Beaufort, ad una brezza tesa.

Come riportato in precedenza, la frequenza percentuale dei venti nell'area di Capo Frasca è del tutto analoga a quella delle altre zone della Sardegna e riportata in Tab. 4.3.3.

L'eliofania massima è registrata anche in questo caso a Luglio, pari a 18,8 h/g. Il numero di ore solari giornaliere è massimo nel periodo estivo 10,6 h/g e minimo nel periodo invernale con solo 5 h/g. Anche in questo caso si nota come le stagioni intermedie quali primavera (7,8 h/g) ed autunno (7,4 h/g) presentano valori intermedi di eliofania compresi tra i due end-members estivi ed invernali.

La radiazione solare globale nell'area di Capo Frasca è analoga a quella di Cagliari-Elmas come

rilevato da database AM e da Lavaglini et al. 1987. Questa è pari a circa 196 MJ/m² anno con estremi in Dicembre (7 MJ/m²) e Luglio (27 MJ/m²). La media mensile di radiazione solare globale è pari a 196 MJ/m²/12 = ≈16 MJ/m². Tali dati sono forniti con una media di misurazioni effettuata nel periodo tra il 1994 ed il 2016.

Capo Frasca (applicabile a Tharros e Traiani)	Mesi												Stagioni				Anno
(1971-2000)	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Inv	Pri	Est	Aut	
T. max. media (°C)	13,2	13,2	14,7	16,7	20,8	24,5	27,8	28,8	26	21,9	17,3	14,4	13,6	17,4	27	21,7	19,9
T. min. media (°C)	7,6	7,5	8,6	10,3	13,7	17,3	20,1	21,1	18,7	15,3	11,3	8,8	8	10,9	19,5	15,1	13,4
T. max. assoluta (°C)	19,6	20,2	25,4	29,2	33,4	36	41,4	41,6	37	36	27,8	21,2	21,2	33,4	41,6	37	41,6
	1979	1977	1981	1992	1999	1994	1993	1999	1993	1981	1985	1989					
T. min. assoluta (°C)	-4,8	-1,2	0,4	3,6	6,6	10,6	12,6	14,4	9,2	6	2	-1,8	-4,8	0,4	10,6	2	-4,8
	1981	1984	1971	1979	1987	1991	1981	1981	1977	1974	1972	1980					
Giorni di calura (T _{max} ≥ 30 °C)	0	0	0	0	0	3	7	8	3	0	0	0	0	0	18	3	21
Giorni di gelo (T _{min} ≤ 0 °C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Precipitazioni (mm)	50	60,5	44,4	51,4	32,8	16,7	4,4	7,3	34,2	69,7	92,5	65	175,5	128,6	28,4	196,4	528,9
Giorni di pioggia	8	8	7	8	5	2	1	1	4	8	10	9	25	20	4	22	71
Giorni di nebbia	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	3	3	2	2	10
Umidità relativa media (%)	85	83	82	82	80	78	78	78	78	81	83	84	84,3	81,3	78	80,7	81
Eliofania assoluta (h/g)	4,5	5,8	6,7	7,3	8,7	10,2	18,8	10	8,1	6,7	4,9	4,1	5	7,8	10,6	6,8	7,4
Vento (km/h)	16	16	15	15	15	15	15	15	15	16	16	16	16	15	15	16	15,5

Tabella 4.3.3: Dati climatici del trentennio 1971-2000 per la stazione meteorologica di Capo Frasca (atlante climatico d'Italia).
Stazione di proprietà AM, localizzazione 39°44'52.32"N, 8°27'24.99"E, Z = 92 m s.l.m., Comune di Arbus.

Il campionamento dei materiali litoidi (pietre e malte)

5.1 Tipologia e metodi di campionamento

Il campionamento dei materiali sui monumenti è stato realizzato in accordo con le locali Soprintendenze Archeologiche che hanno regolamentato il peso di campione prelevato, di solito compreso fra circa 2 e 200 g.

Il campionamento è stato eseguito seguendo le raccomandazioni Nor.Ma.L 3/80 secondo cui il volume di materiale prelevato deve essere rappresentativo, cioè riassumere in se le problematiche relative ad una zona omogenea, affinché tutte le proprietà misurate siano indipendenti dalle dimensioni del campione. Durante il prelievo è avvenuta la rimozione meccanica mediante pennello a setola morbida per i materiali polverulenti, mediante bisturi per i materiali incoerenti e mediante scalpello/martello e carotaggio (drilling) per i materiali coerenti.

Il materiale campionato è stato registrato in apposite schede di campionamento (Logs) secondo un documento di memorizzazione Nor.Ma.L 2/80 ed i punti di campionamento, con associato nome del campione, sono stati registrati su una planimetria in scala dell'edificio.

Durante il campionamento è stata fatta una breve descrizione macroscopica del materiale appuntando altri dati quali ad esempio l'altezza di prelievo rispetto al livello di calpestio, la posizione nell'edificio o l'eventuale presenza di alterazioni o deposizioni superficiali.

Tali mappe e schede di campionamento sono di seguito mostrate per tutti gli edifici in analisi.

I campioni sono stati conservati in apposite buste in plastica al fine di non alterare il grado di umidità interno. Il nome dei campioni è composto da una sigla formata da due lettere che identifica il monumento di provenienza (e.g. FT = Forum Traiani), seguita da un numero in ordine di prelievo. Per i monumenti di Tharros, Forum Traiani e Nora, oltre al prelievo di materiali in monumento è stato effettuato anche un campionamento in campagna per prelevare dei materiali litoidi da confrontare con quelli monumentali al fine di risalire alle cave storiche di estrazione.

5.2 Le Piccole Terme ed il Monte Su Casteddu

Nell'edificio delle Piccole Terme, sono state prelevate 33 malte (sigla MP) suddivise in due grandi gruppi quali allettamento di conci/laterizi ed arricci (Tab. 5.2.1). La mappa di prelievo è illustrata in (Fig. 5.2.1).

Per quanto riguarda i geo-materiali del Teatro, si ricorda che non è stato eseguito un campionamento su monumento ma esclusivamente in cava storica situata a Monte Su Casteddu, (Pula) dove, un totale di 6 campioni, appartenenti alla *facies* grigio-violacea dacitica/riodacitica sono stati prelevati (Tab. 5.2.2, Fig. 5.2.2, 5.2.3). Nel Monte Su Casteddu, ricordiamo, alcuni autori (Previato 2016, Columbu 2018, Garau 2005, Columbu & Melis 2000), hanno identificato la cava storica di estrazione dei materiali da costruzione del Teatro di Nora (gradinate) mediante incrocio di dati geochimici e minero-petrografici tra rocce ivi affioranti e rocce prelevate dalle gradinate dello stesso edificio.

Campione	Zona campionamento	Funzione	Altezza di prelievo (cm)	Alterazioni/deposizioni superficiali
MP1	Atrio		67	Patina biologica, efflorescenze
MP2	Atrio		69	Patina biologica, efflorescenze
MP3	Atrio		73	Patina biologica, efflorescenze
MP6	Atrio		112	Enucleazione aggregato, decoesione
MP7	<i>Apodyterium</i>		88	Enucleazione aggregato, decoesione
MP10	<i>Preafurnium</i>		178	Decoesione, patina biologica
MP15	<i>Preafurnium</i>		153	Decoesione, patina biologica
MP16	<i>Preafurnium</i>		161	Decoesione, patina biologica
MP17	<i>Preafurnium</i>		133	Enucleazione aggregato
MP25	<i>Frigidarium</i>		98	Enucleazione aggregato
MP28	<i>Tepidarium II</i>		67	Enucleazione aggregato
MP29	Atrio	Allettamento conci/laterizi	67	Enucleazione aggregato, patina biologica
MP30	Atrio		58	Efflorescenze, enucleazione aggregato
MP31	<i>Tepidarium I</i>		112	Patina biologica
MP33	<i>Tepidarium I</i>		119	Decoesione, efflorescenze
MP34	<i>Tepidarium I</i>		126	Decoesione, patina biologica
MP35	<i>Tepidarium I</i>		86	Enucleazione aggregato
MP38	<i>Preafurnium</i>		118	Patina biologica
MP41	<i>Preafurnium</i>		100	Enucleazione aggregato
MP43	<i>Preafurnium</i>		148	Enucleazione aggregato
MP44	<i>Preafurnium</i>		167	Decoesione, patina biologica
MP46	<i>Preafurnium</i>		144	Patina biologica
MP47	<i>Calidarium</i>		111	Enucleazione aggregato
MP4	Atrio		55	Decoesione, patina biologica
MP5	Atrio		55	Decoesione, patina biologica
MP8	<i>Apodyterium</i>		178	Decoesione
MP9	<i>Apodyterium</i>		178	Decoesione
MP12	<i>Apodyterium</i>		101	Decoesione
MP13	<i>Apodyterium</i>	Arriccio	122	Decoesione
MP14	<i>Calidarium</i>		90	Decoesione, patina biologica
MP21	<i>Frigidarium</i>		89	Decoesione, patina biologica
MP22	<i>Frigidarium</i>		56	Patina biologica, enucleazione aggregato
MP23	<i>Frigidarium</i>		98	Decoesione
MP27	<i>Frigidarium</i>		69	Decoesione

Tabella 5.2.1: Log di campionamento delle malte nelle Piccole Terme secondo normativa Nor.Ma.L 2/80.

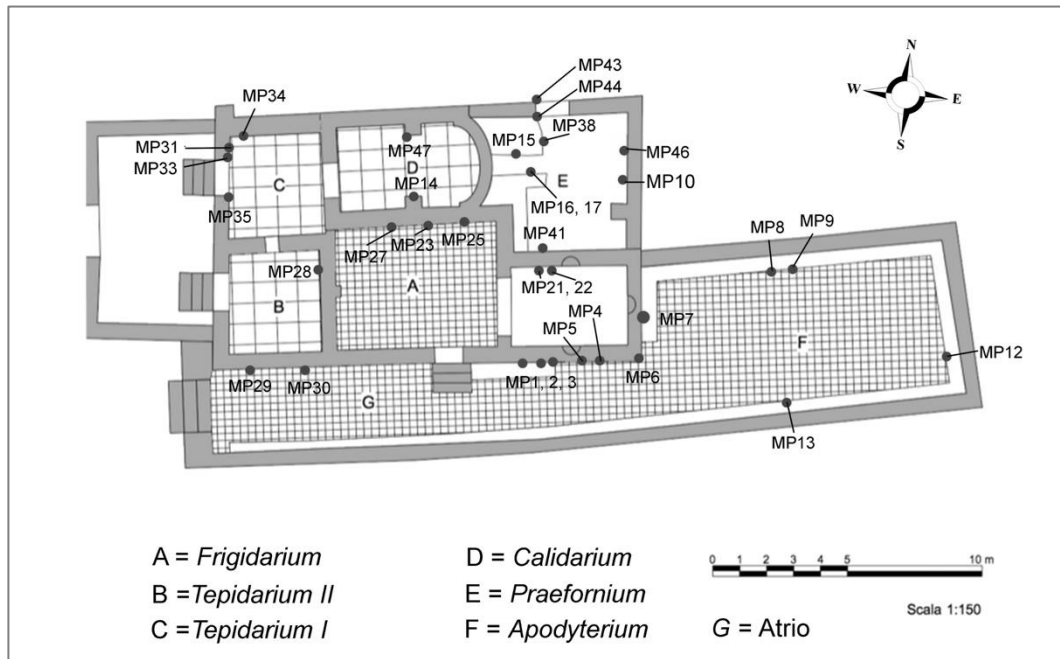


Figura 5.2.1: Mappa con punti di campionamento delle Piccole Terme (Nora). Da Giannattasio et al. 2016, Università degli Studi di Padova, modificato.

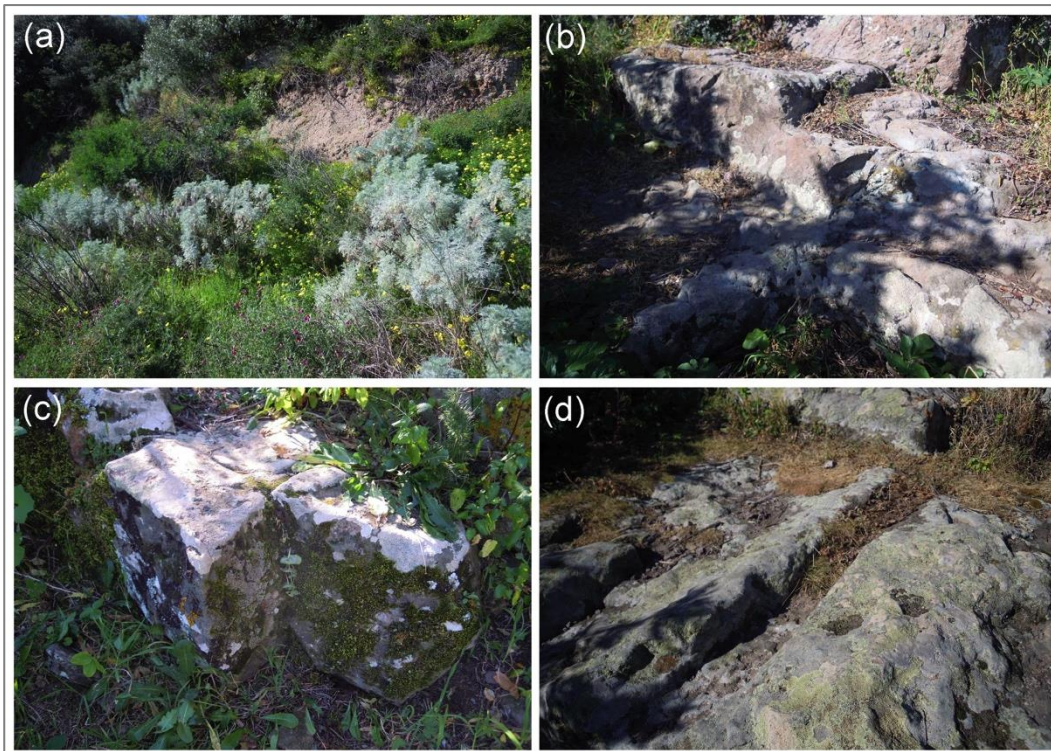


Figura 5.2.2: Campionamento di materiali daciti/riodaciti a Monte Su Casteddu (Pula): (a) fronte di coltivazione con esposizione E, (b) loculi estrattivi di circa 1 m² di superficie, (c) blocco di pietra lavorato con angoli retti, (d) tracce di coltivazione su pianoro di cava. Foto di Fabio Sitzia.

Campione	Litologia	Località	Coordinate di prelievo (gradi, primi, secondi)	Altezza (m s.l.m.)
AN1			39°00'49,54"N - 8°59'51,09"E	46
AN2			39°00'49,09"N - 8°59'51,08"E	45
AN3	Dacite/riodacite	Monte Su	39°00'49,82"N - 8°59'51,05"E	45
AN4	<i>facies</i> grigio-violacea	Casteddu	39°00'49,98"N - 8°59'50,90"E	43
AN5			39°00'50,25"N - 8°59'50,78"E	46
AN6			39°00'50,92"N - 8°59'50,91"E	42

Tabella 5.2.2: Log di campionamento in cava storica a Monte Su Casteddu (Pula) secondo normativa Nor.Ma.L 2/80.



Figura 5.2.3: Localizzazione del Monte su Casteddu nel comune di Pula.

5.3 La Basilica di San Saturnino

La Basilica di San Saturnino in Cagliari rappresenta uno dei principali monumenti architettonici della Sardegna Romanica. La sua complessità, dovuta a tre stratigrafie archeologiche, ha comportato la necessità di prelievo di un elevato numero di campioni suddivisi in: 22 pietre, 18 malte, e 36 marmi (Fig. 5.3.1, 5.3.2, 5.3.3, 5.3.4, Tab. 5.3.1, 5.3.2). I campioni sono identificati con la sigla SS (San Saturnino).

Le 22 pietre campionate appartengono a tre litologie, mentre le 18 malte sono state suddivise in due gruppi principali sulla base della cultura di produzione in: malte Romaniche (medioevali), risalenti ad un periodo compreso fra XI e XII sec. DC, e malte Romane risalenti ad un periodo compreso tra II e IV sec. DC.

Le malte Romaniche sono a loro volta suddivise in gruppi quali calcestruzzi, malte di allettamento di conci/laterizi e di riempimento di cortine murarie.

Le malte Romane sono anch'esse suddivise in gruppi quali allettamenti di conci/laterizi, riempimenti di cortine murarie, rinzafo, arriccio ed intonachino.

Le malte risalenti al V-VI sec. DC non sono state campionate poiché presentavano alcune difficoltà di estrazione.

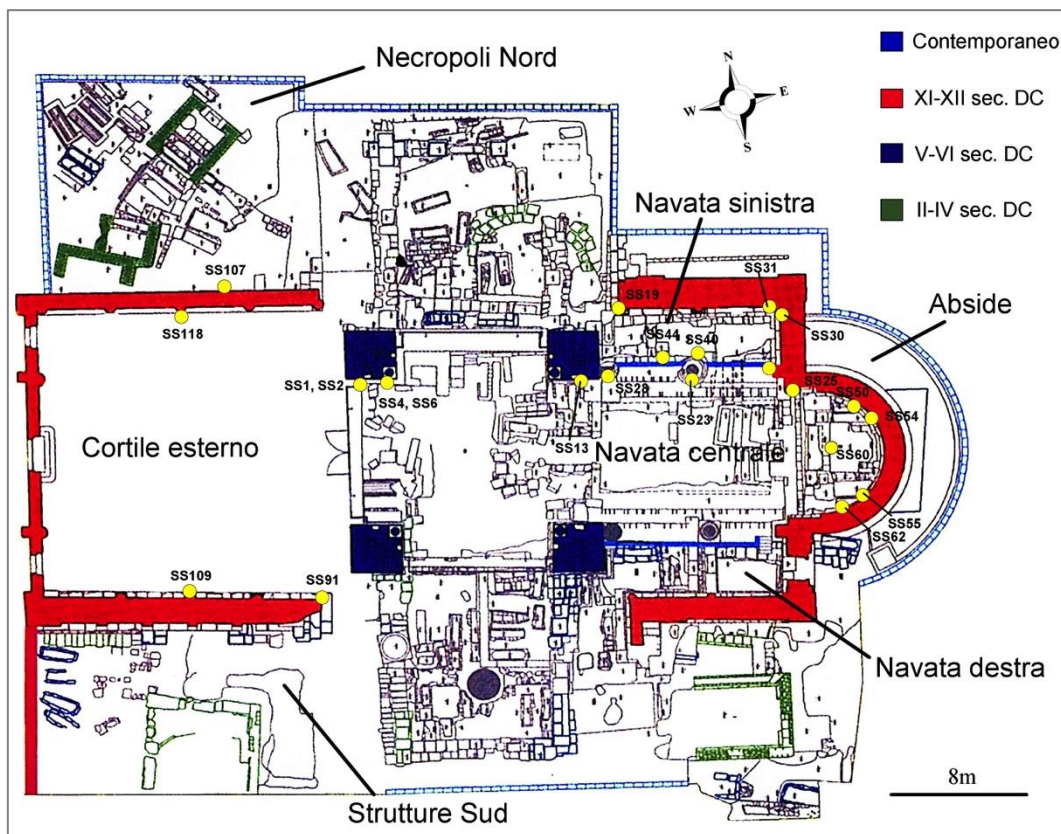


Figura 5.3.1: Mappa con punti di campionamento delle pietre (Basilica di San Saturnino).
Elaborazione grafica della Soprintendenza Archeologica di Cagliari.

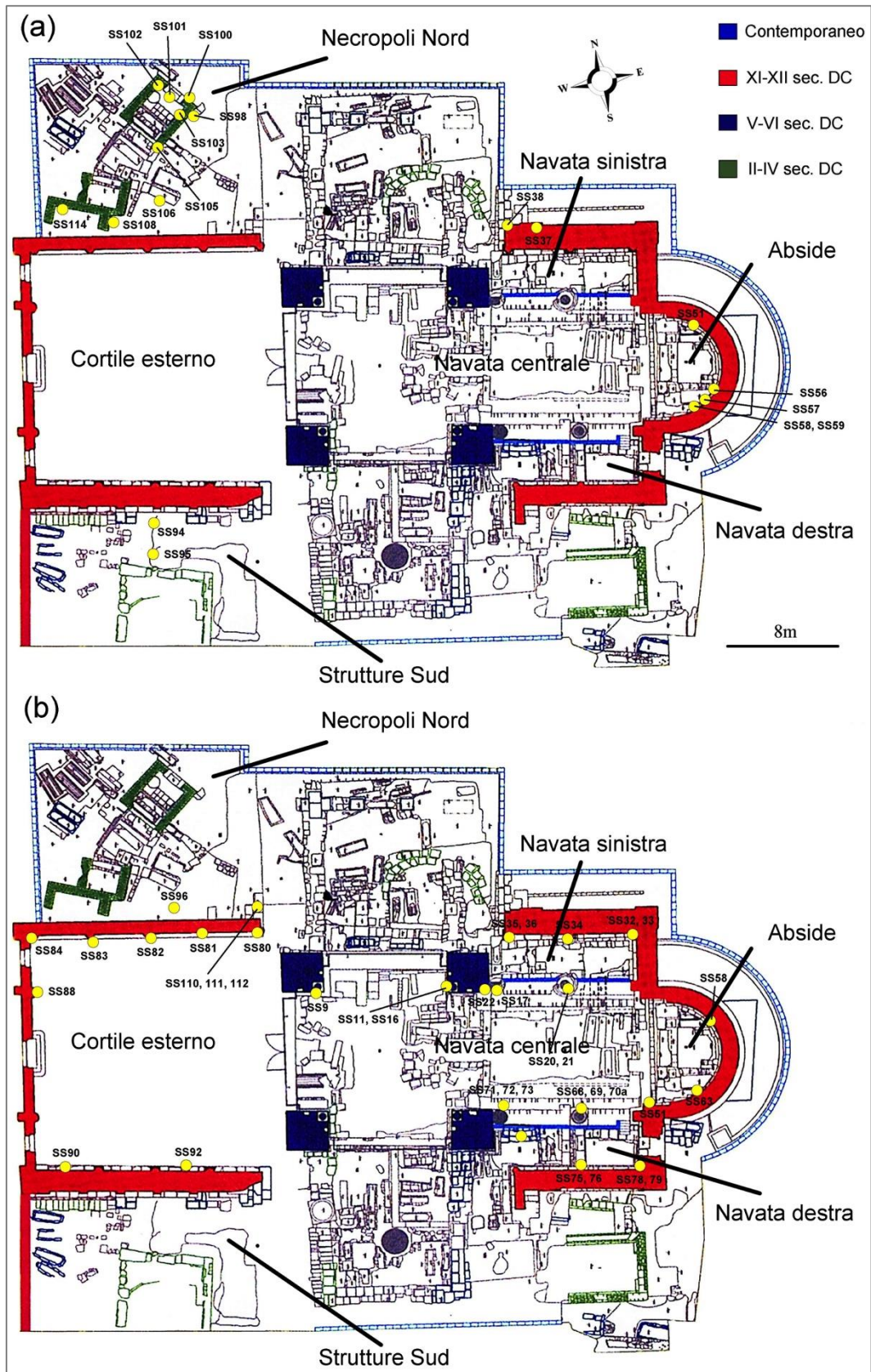


Figura 5.3.2: Campionamento nella Basilica di San Saturnino: (a) malte, (b) marmi.
 Elaborazione grafica della Soprintendenza Archeologica di Cagliari.

Campione	Tipologia	Zona campionamento	Elemento architettonico/Funzione	Altezza di prelievo (cm)	Alterazioni/deposizioni superficiali
SS25				81	Strato di sporczia, residui d'intonaco
SS50				59	Decoesione
SS54	Vulcanite	Abside	Concio	81	Decoesione
SS55				82	Decoesione
SS62				58	Decoesione
SS19				Navata sinistra	Fusto pilastro
SS28		Navata centrale	Concio	-19	Decoesione
SS31	Pietra Cantone	Navata sinistra	Concio	31	Decoesione
SS40		Navata sinistra	Concio	-17	Decoesione, efflorescenze
SS44		Navata sinistra	Concio	-34	Decoesione
SS91		Cortile esterno	Concio	132	Decoesione, efflorescenze, pitting
SS118		Cortile esterno	Concio	115	Patine inorganiche, decoesione, pitting
SS1		Navata centrale	Basamento colonna	31	Nessuna
SS2		Navata centrale	Fusto colonna	45	Residui d'intonaco
SS4		Navata centrale	Concio	50	Residui d'intonaco
SS6	Pietra Forte	Navata centrale	Concio	141	Nessuna
SS13		Navata centrale	Concio	159	Nessuna
SS23		Navata centrale	Capitello	250	Nessuna
SS30		Navata sinistra	Concio	-15	Nessuna
SS60		Abside	Concio	99	Nessuna
SS107		Necropoli Nord	Fusto colonna	40	Nessuna
SS109		Cortile esterno	Fusto colonna	35	Nessuna
SS37		Navata sinistra	Calcestruzzo pavimentale	-15	Decoesione
SS38		Navata sinistra	Calcestruzzo pavimentale	-9	Decoesione
SS51	Malta Romanica (XI-XII sec. DC)	Abside	Allettamento conci/laterizi	-41	Decoesione
SS56		Abside	Allettamento conci/laterizi	-31	Decoesione
SS57		Abside	Allettamento conci/laterizi	-45	Decoesione
SS58		Abside	Allettamento conci/laterizi	-25	Decoesione
SS59		Abside	Allettamento conci/laterizi	-33	Decoesione
SS94		Strutture Sud	Riempimento cortina	45	Patina biologica
SS95	Strutture Sud	Riempimento cortina	42	Patina biologica	
SS100	Malta Romana (II-IV sec. DC)	Necropoli Nord	Allettamento conci/laterizi	82	
SS103			Allettamento conci/laterizi	75	
SS105			Allettamento conci/laterizi	103	
SS114			Allettamento conci/laterizi	111	Decoesione
SS108			Riempimento cortina	42	
SS98			Riempimento cortina	40	
SS102			Rinzaffo	83	
SS101			Arriccio	85	
SS106		Intonachino	82		

Tabella 5.3.1: Log di campionamento di pietre e malte nella Basilica di San Saturnino secondo normativa Nor.Ma.L 2/80.

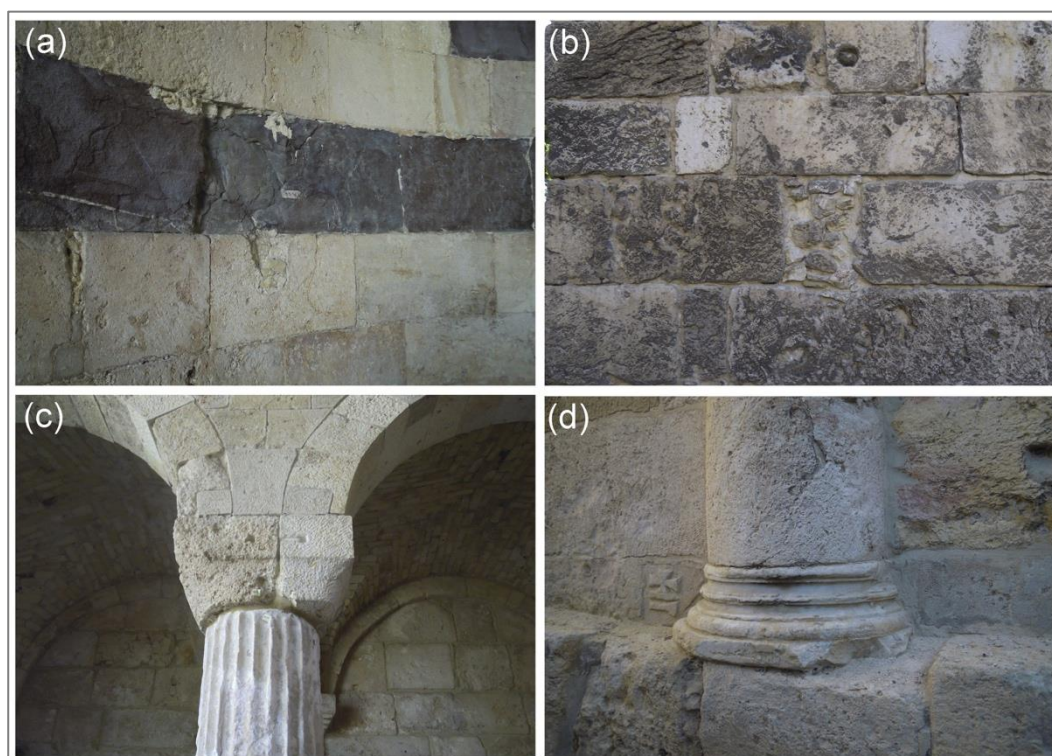


Figura 5.3.3: Campionamento nella Basilica di San Saturnino: (a) parete con conci alternati di pietra Forte e vulcanite (*opera bicroma*), (b) parete in pietra Cantone, (c) fusto colonna marmoreo, (d) basamento colonna marmoreo. Foto di Fabio Sitzia.

Campione	Zona campionamento	Colore	Elemento architettonico/Funzione	Altezza di campionamento (cm)	Alterazioni/deposizioni superficiali
SS9	Navata centrale		Dado colonna	40	Decoesione
SS16	Navata centrale		Basamento colonna	40	Patine biologiche, ossaliche
SS17	Navata centrale		Basamento colonna	55	Patina inorganica
SS20	Navata centrale		Architrave	250	Crosta
SS21	Navata centrale		Basamento colonna	35	Nessuna
SS22	Navata centrale		Fusto colonna	35	Nessuna
SS51	Abside		Concio (ex architrave)	130	Nessuna
SS68	Navata centrale		Dado colonna	10	Decoesione
SS69	Navata centrale		Fusto colonna	50	Crystal sugar corrosion, esfoliazione
SS70a	Navata centrale		Capitello	220	Crystal sugar corrosion, esfoliazione
SS71	Navata centrale		Dado colonna	15	Crystal sugar corrosion, esfoliazione
SS72	Navata centrale		Basamento colonna	40	Crystal sugar corrosion, esfoliazione
SS73	Navata centrale		Capitello	220	Crystal sugar corrosion, esfoliazione
SS75	Navata destra	Bianco	Basamento colonna	50	Crystal sugar corrosion, esfoliazione
SS79	Navata destra		Basamento colonna	50	Nessuna
SS80	Cortile esterno		Basamento colonna	55	Decoesione, strato di sporozia
SS81	Cortile esterno		Basamento colonna	35	Decoesione, strato di sporozia
SS82	Cortile esterno		Basamento colonna	30	Decoesione, strato di sporozia
SS83	Cortile esterno		Basamento colonna	40	Decoesione, strato di sporozia
SS84	Cortile esterno		Dado colonna	10	Decoesione, strato di sporozia
SS88	Cortile esterno		Basamento colonna	55	Decoesione, strato di sporozia
SS90	Cortile esterno		Lastra trovante	/	Strato di sporozia
SS110	Necropoli Nord		Lastra trovante	/	Nessuna
SS111	Necropoli Nord		Lastra trovante	/	Nessuna
SS112	Necropoli Nord		Lastra trovante	/	Patina biologica, crosta carbonatica
SS34	Navata sinistra		Basamento colonna	40	Patina biologica, crosta carbonatica
SS36	Navata sinistra		Fusto colonna	30	Nessuna
SS78	Navata destra		Fusto colonna	45	Erosione differenziale
SS11	Navata centrale		Fusto colonna	45	Decoesione, erosione differenziale
SS58	Abside		Frammento di concio	-10	Nessuna
SS76	Navata destra	Colorato	Fusto colonna	25	Nessuna
SS92	Cortile esterno		Lastra trovante	/	Strato di sporozia
SS96	Necropoli Nord		Capitello trovante	/	Strato di sporozia
SS35	Navata sinistra		Basamento colonna	25	Nessuna
SS33	Navata sinistra		Fusto colonna	65	Nessuna
SS63	Abside		Concio (ex fusto colonna)	-30	Nessuna

Tabella 5.3.2: Log di campionamento dei marmi nella Basilica di San Saturnino secondo normativa Nor.Ma.L 2/80.

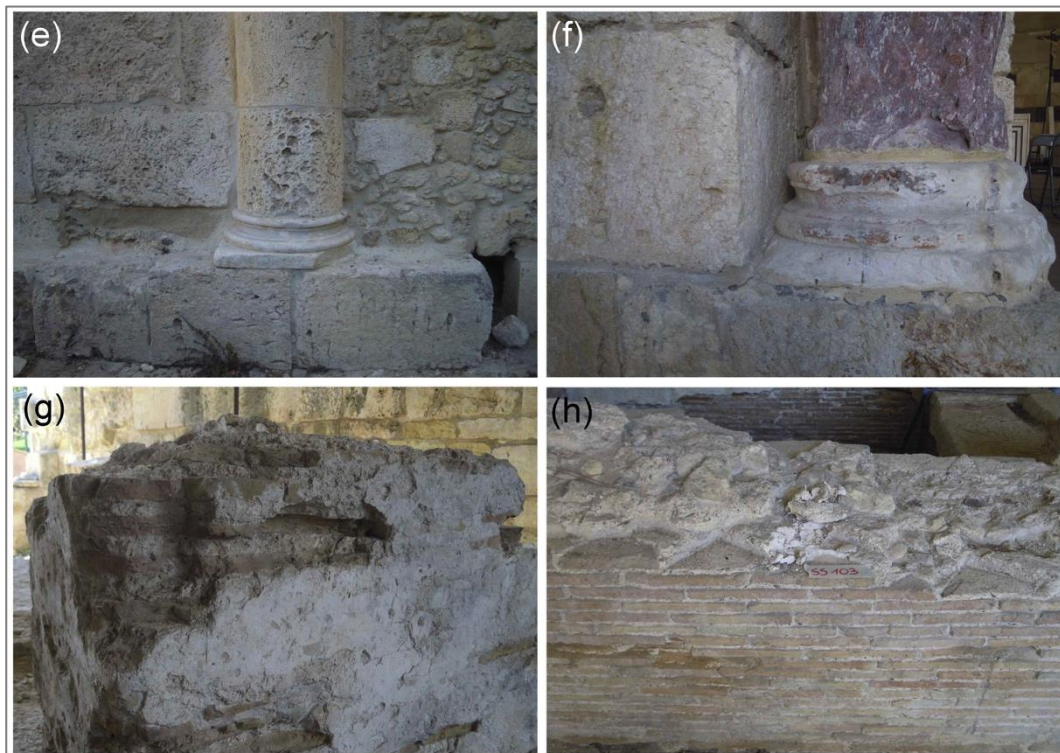


Figura 5.3.4: Campionamento nella Basilica di San Saturnino: (e) fusto colonna in pietra Forte, (f) fusto colonna in marmo rosso, (g) malta di intonachino, (h) malta di allettamento dei laterizi. Foto di Fabio Sitzia.

5.4 Il lastricato del *Cardo* e le Terme II

Campione	Litologia/Malta	Zona campionamento	Elemento architettonico/Funzione	Altezza di prelievo (cm)	Alterazioni/deposizioni superficiali
TH1	Vulcanite	Centro città	Concio basolato	0	Patina biologica
TH2	Arenaria	Centro città	Dado colonna	25	Decoesione
TH3	Vulcanite	Centro città	Concio basolato	0	Nessuna
TH4	Vulcanite	Centro città	Concio basolato	0	Patina biologica
TH5	Vulcanite	Centro città	Concio basolato	0	Patina biologica
TH8	Malta	<i>Tofet</i>	Arriccio	15	Nessuna
TH9	Malta	<i>Tofet</i>	Intonachino	66	Tracce di pitture
TH10	Arenaria	Fossato	Copertura canale di scolo	-115	Decoesione
TH11	Vulcanite	Fossato	Concio muro perimetrale	164	Nessuna
TH12	Vulcanite	Fossato	Concio muro perimetrale	85	Nessuna
TH13	Vulcanite	Fossato	Concio muro perimetrale	74	Nessuna
TH14	Malta	Cisterna, città alta	Allettamento conci/aterizi	27	Decoesione
TH15p	Malta	Cisterna, città alta	<i>Trullissatio</i>	20	Nessuna
TH16p	Malta	Cisterna, città alta	<i>Trullissatio</i>	20	Nessuna
TH17p	Malta	Cisterna, città alta	<i>Trullissatio</i>	22	Nessuna
TH19	Arenaria	Terme II, <i>Frigidarium</i>	Concio	129	Decoesione
TH20	Malta	Terme II, <i>Frigidarium</i>	Allettamento conci/aterizi	122	Decoesione, enucleazione aggregato
TH21	Malta	Terme II, <i>Frigidarium</i>	Allettamento conci/aterizi	101	Decoesione, enucleazione aggregato
TH22	Malta	Terme II, <i>Frigidarium</i>	Allettamento conci/aterizi	67	Decoesione, enucleazione aggregato
TH23	Malta	Terme II, <i>Laconicum</i>	Allettamento conci/aterizi	21	Decoesione, enucleazione aggregato
TH24	Malta	Terme II, <i>Tepidarium</i>	Allettamento conci/aterizi	88	Decoesione, enucleazione aggregato
TH25	Malta	Terme II, <i>Calidarium</i>	Allettamento conci/aterizi	67	Decoesione, enucleazione aggregato
TH26	Malta	Terme II, sala F	Calcestruzzo delle volte	280	Enucleazione aggregato
TH27	Malta	Terme II, <i>Apodyterium</i>	Calcestruzzo delle volte	255	Enucleazione aggregato
TH28	Malta	Terme II, sala E	<i>Trullissatio</i>	72	Nessuna
TH29	Malta	Terme II, <i>Frigidarium</i>	<i>Trullissatio</i>	124	Nessuna
TH30	Malta	Terme II, <i>Frigidarium</i>	<i>Trullissatio</i>	-85	Nessuna
TH31	Malta	Terme II, <i>Calidarium</i>	<i>Trullissatio</i>	-96	Nessuna
TH32	Malta	Terme II, <i>Calidarium</i>	<i>Trullissatio</i>	-77	Nessuna
TH33	Malta	Terme II, <i>Frigidarium</i>	Calcestruzzo pavimentale	12	Patina biologica
TH34	Malta	Terme II, <i>Tepidarium</i>	Calcestruzzo pavimentale	19	Patina biologica
TH35	Malta	Terme II, <i>Laconicum</i>	Calcestruzzo pavimentale	0	Patina biologica
TH36	Malta	Terme II, <i>Tepidarium</i>	Calcestruzzo pavimentale	0	Patina biologica
TH37	Malta	Terme II, <i>Frigidarium</i>	Calcestruzzo pavimentale	0	Patina biologica
TH38a	Malta	Terme II, sala E	Arriccio	35	Enucleazione aggregato
TH38b	Malta	Terme II, sala E	Intonachino	35	Nessuna
TH39a	Malta	Terme II, sala F	Arriccio	57	Enucleazione aggregato
TH39b	Malta	Terme II, sala F	Intonachino	57	Nessuna
TH40a	Malta	Terme II, Cisterna	Arriccio	40	Enucleazione aggregato
TH40b	Malta	Terme II, Cisterna	Intonachino	40	Nessuna
TH42	Vulcanite	Terme II, sala D	Soglia portale	0	Patina biologica
TH43	Vulcanite	Terme II, sala D	Soglia portale	0	Strato di sporcizia
TH44	Vulcanite	Terme II, ingresso giardino	Concio	23	Strato di sporcizia, crosta
TH45	Vulcanite	<i>Cardo</i> , Ovest Terme II	Concio basolato	0	Patina biologica
TH46	Vulcanite	<i>Cardo</i> , Ovest Terme II	Concio basolato	0	Patina biologica
TH47	Vulcanite	<i>Cardo</i> , Ovest Terme II	Concio basolato	0	Patina biologica
TH48	Vulcanite	<i>Cardo</i> , Nord Terme II	Concio basolato	0	Patina biologica
TH49	Vulcanite	<i>Cardo</i> , Nord Terme II	Concio basolato	0	Patina biologica
TH50	Vulcanite	<i>Cardo</i> , Nord Terme II	Concio basolato	0	Nessuna
TH51	Vulcanite	<i>Cardo</i> , Nord Terme II	Concio sponda basolato	0	Patina biologica

Tabella 5.4.1: Log di campionamento di malte, vulcaniti ed arenarie nella zona archeologica di Tharros secondo Nor.Ma.L 2/80.

Come visibile da Fig. 5.4.1a, b e 5.4.2 e Tab. 5.4.1, il campionamento nell'area archeologica di Tharros è iniziato dalla città alta (Nord) per poi proseguire nella zona centrale ed infine sull'edificio delle Terme II o Grandi Terme, posto nella periferia Sud. I campioni sono identificati dalla sigla TH (Tharros).

All'interno del sito sono state campionate 19 vulcaniti di cui 17 provenienti dagli edifici (conci del basolato del *Cardo* e conci perimetrali della zona del fossato) e 2 (THc6, THc7, Tab. 5.4.2) da un affioramento situato nella città alta dove, sono presenti tracce di coltivazione. Al di fuori del sito invece, sono stati prelevati da affioramenti locali, 7 campioni di vulcanite (Tab. 5.4.2, Fig. 5.4.3).

Da registrare inoltre il prelievo di 3 campioni di arenaria all'interno del sito provenienti dagli edifici.

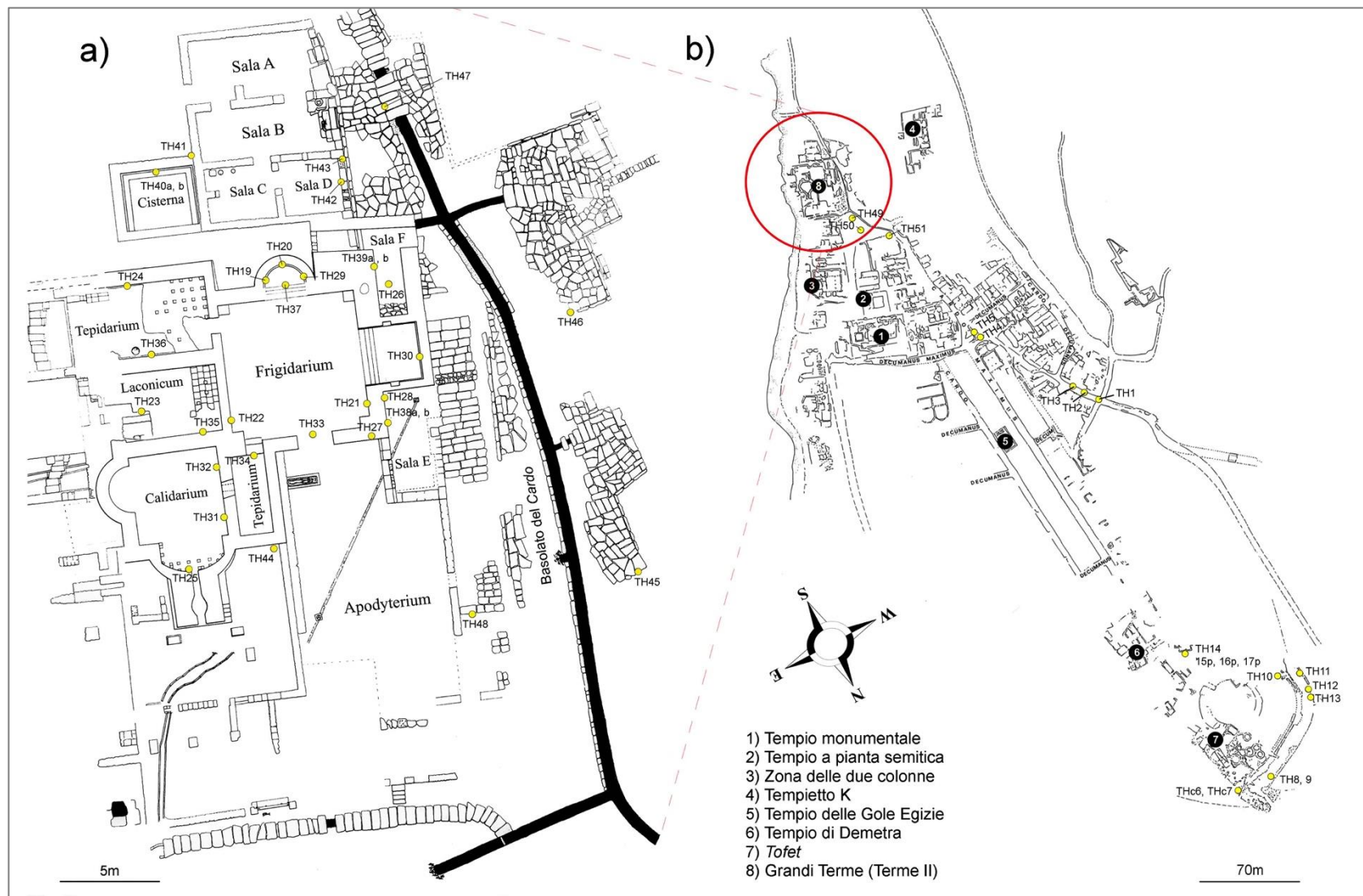


Figura 5.4.1: Campionamento nell'area archeologica di Tharros: (a) l'edificio delle Grandi Terme, (b) l'intera area archeologica, da: Floris (2016), Architettura templare a Tharros – II. Il “Tempio a pianta di tipo semitico” e il “Tempio di Demetra”.



Figura 5.4.2: Campionamento nell'area archeologica di Tharros: (a) parete con conci di arenaria e vulcanite, (b) affioramento di vulcanite nella città alta, (c) copertura spiovente in arenaria, (d) calcestruzzo pavimentale, (e) malta di allettamento dei laterizi, (f) *Trullissatio*, (g) intonachino affrescato, (h) calcestruzzo delle volte. Foto di Fabio Sitzia.

Nelle Terme II invece sono state campionate solo malte per un totale di 30 pezzi, suddivise in 6 gruppi sulla base della rivestita nell'edificio, quali allettamento di conci/laterizi, calcestruzzi pavimentali e voltati, *Trullissatio*, arricci ed intonachini. Da precisare che un ristretto numero di

malte è stato campionato anche nella zona del *Tofet* per ottenere un confronto diretto con quelle dell'edificio termale II.

Un campionamento di una serie stratigrafica di malte indicata in Tab. 5.4.1 come serie “p”, prelevata in una cisterna è rappresentata dai campioni di *Trullissatio* TH15p, 16p e 17p.

Tali campioni, appartenenti ad uno stesso punto di prelievo nella stessa struttura, sono stati prelevati per meglio definire le modalità di confezionamento di malte utilizzate per l'impermeabilizzazione delle cisterne Romane.

Campione	Litologia	Località	Coordinate di prelievo (gradi, primi, secondi)	Altezza (m s.l.m.)
THc6		Area archeologica di Tharros	39°52'37,12"N - 8°26'28,05"E	22
THc7		Area archeologica di Tharros	39°52'37,12"N - 8°26'28,05"E	22
PB43		Capo San Marco (Sud di Tharros)	39°51'30,51"N - 8°26'11,48"E	6
PB44		Capo San Marco (Sud di Tharros)	39°52'24,05"N - 8°26'19,35"E	27
PB45	Vulcanite	Capo San Marco (Sud di Tharros)	39°52'00,62"N - 8°26'19,63"E	18
PB46		Funtana Meiga (Nord di Tharros)	39°53'56,14"N - 8°25'58,58"E	26
PB47		Funtana Meiga (Nord di Tharros)	39°54'17,32"N - 8°26'08,27"E	14
PB48		Funtana Meiga (Nord di Tharros)	39°54'21,25"N - 8°26'09,61"E	13
PB49		Funtana Meiga (Nord di Tharros)	39°54'32,25"N - 8°26'00,38"E	37

Tabella 5.4.2: Log di campionamento in affioramento nelle località di Capo San Marco, Funtana Meiga ed all'interno dell'area archeologica di Tharros (normativa Nor.Ma.L 2/80).

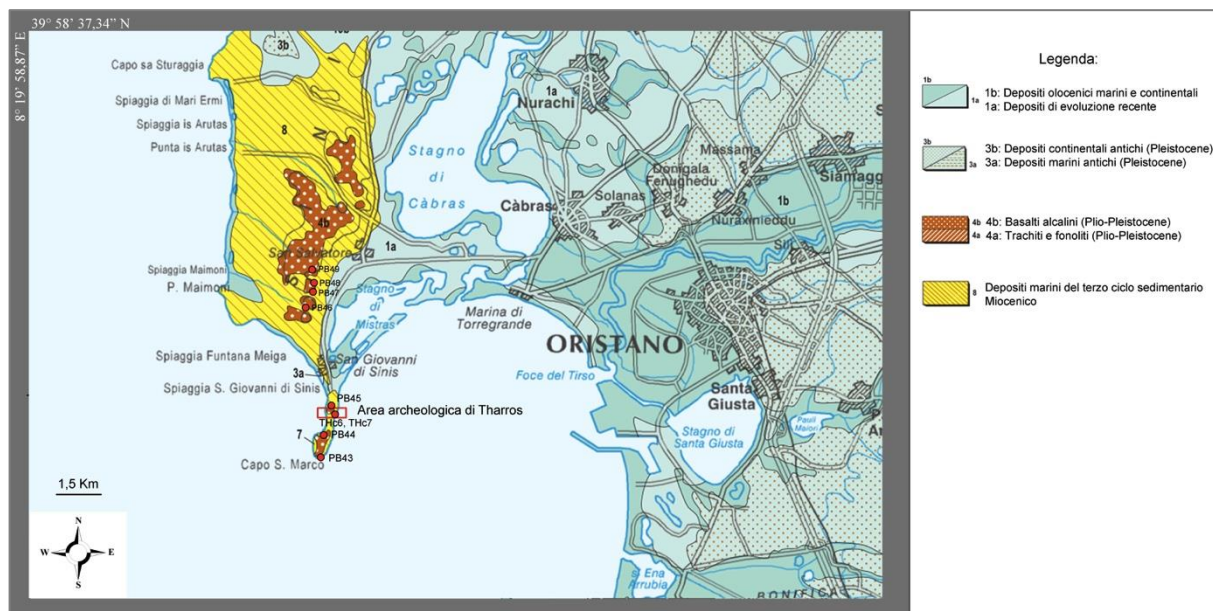


Figura 5.4.3: Campionamento di materiali lapidei fuori dal sito archeologico di Tharros.

5.5 Il Forum Traiani

L'intervento di campionamento nell'area del Forum Traiani è avvenuto con il prelievo dell'edificio di 18 vulcaniti mentre altre 6 sono state campionate direttamente in un affioramento musealizzato presente nella zona Sud dell'area archeologica (area mineraria), dove sono evidenti tracce di estrazione (Fig. 5.5.1a, Tab. 5.5.1).

Il numero totale di malte prelevate è pari a 47. Queste sono state suddivise in 6 gruppi principali sulla base della funzione architettonica che queste rivestono all'interno dell'edificio (Fig. 5.5.1b, Tab. 5.5.2). In Fig. 5.5.2 sono mostrate alcune strutture del complesso termale in cui è avvenuto il campionamento. I campioni sono identificati con la dicitura FT (Forum Traiani).

Campione	Zona campionamento	Elemento architettonico/Funzione	Altezza di prelievo (cm)	Alterazioni/deposizioni superficiali
FT1	<i>Natatio</i>	Gradino	-7	Patina biologica
FT2	<i>Natatio</i>	Pilastro arcata	31	Decoesione, esfoliazione
FT3	<i>Natatio</i>	Gradino	-102	Patina biologica
FT4	<i>Natatio</i>	Gradino	-102	Patina biologica
FT5	<i>Natatio</i>	Gradino	-105	Patina biologica
FT6	<i>Natatio</i>	Gradino	-80	Crosta
FT7	<i>Natatio</i>	Gradino	-65	Patina biologica
FT8	<i>Natatio</i>	Gradino	-40	Patina biologica
FT9	<i>Natatio</i>	Concio trovante	/	Patina biologica
FT10	<i>Natatio</i>	Gradino	11	Nessuna
FT11	<i>Natatio</i>	Gradino	0	Patina biologica
FT12	<i>Apodyterium</i>	Concio	104	Patina biologica
FT13	<i>Apodyterium</i>	Gradino	20	Patina biologica
FT14	<i>Natatio</i>	Gradino	35	Patina biologica
FT15	<i>Tepidarium</i>	Concio	172	Patina biologica
FT16	<i>Frigidarium</i>	Concio	144	Crosta
FT17	<i>Calidarium</i>	Concio	100	Crosta
FTc18	Area mineraria Sud	/	45	Patina biologica
FTc19	Area mineraria Sud	/	52	Patina biologica
FTc20	Area mineraria Sud	/	61	Patina biologica
FTc21	Area mineraria Sud	/	23	Patina biologica
FTc22	Area mineraria Sud	/	20	Patina biologica
FTc23	Area mineraria Sud	/	37	Patina biologica
FT28	Vasca di captazione	Concio	22	Nessuna

Tabella 5.5.1: Log di campionamento delle vulcaniti nel Forum Traiani secondo Nor.Ma.L 2/80.

Nell'edificio sono state campionate anche due serie stratigrafiche di malte ("p" ed "s"); la prima costituita dai campioni FT42p, 43p, 44p, 45p, 46p, 47p, 48p e 49p è stata prelevata all'interno di una vasca del *Frigidarium* (sala "n", Fig. 5.5.1b).

Una seconda serie stratigrafica consiste nei campioni FT52s, 53s, 54s, 55s che, messi in opera consecutivamente, formavano uno strato impermeabilizzante in una cisterna posta nel cortile Est del sito (struttura "v", Fig. 5.5.1b).

È da precisare che sono state campionate diverse serie stratigrafiche minori composte da arriccio ed intonachino (e.g. FT39a, FT39b) oppure da *Trullissatio* ed arriccio (e.g. FT56a', FT56b').

Campione	Zona campionamento	Elemento architettonico/Funzione	Altezza di prelievo (cm)	Alterazioni/deposizioni superficiali
FT24	<i>Apodyteruim</i>	Calcestruzzo pavimentale	0	Patina biologica
FT25	<i>Apodyteruim</i>	Calcestruzzo pavimentale	0	Patina biologica
FT26	<i>Apodyteruim</i>	Calcestruzzo pavimentale	0	Patina biologica
FT27	<i>Apodyteruim</i>	Calcestruzzo pavimentale	0	Patina biologica
FT29	<i>Apodyteruim</i>	Calcestruzzo pavimentale	0	Nessuna
FT30	<i>Frigidarium</i>	Calcestruzzo pavimentale	0	Nessuna
FT31a	<i>Frigidarium</i>	Calcestruzzo pavimentale	0	Nessuna
FT31b	<i>Frigidarium</i>	Allettamento del mosaico	0	Nessuna
FT32a	<i>Frigidarium</i>	Calcestruzzo pavimentale	0	Nessuna
FT32b	<i>Frigidarium</i>	Allettamento del mosaico	0	Nessuna
FT33	<i>Frigidarium</i>	Allettamento conci/laterizi	12	Nessuna
FT34	<i>Apodyteruim</i>	Calcestruzzo pavimentale	0	Patina biologica
FT37a	Struttura abitativa 2	Arriccio	56	Nessuna
FT37b	Struttura abitativa 2	Intonachino	56	Tracce di pitture
FT38a	Struttura abitativa 2	Arriccio	55	Nessuna
FT38b	Struttura abitativa 2	Intonachino	55	Tracce di pitture
FT39a	Struttura abitativa 3	Arriccio	49	Nessuna
FT39b	Struttura abitativa 3	Intonachino	49	Tracce di pitture
FT40a	Struttura abitativa 3	Arriccio	53	Nessuna
FT40b	Struttura abitativa 3	Intonachino	53	Tracce di pitture
FT41a	Struttura abitativa 3	Arriccio	57	Nessuna
FT41b	Struttura abitativa 3	Intonachino	57	Tracce di pitture
FT42p	<i>Frigidarium</i>	Arriccio	60	Nessuna
FT43p	<i>Frigidarium</i>	Intonachino	60	Tracce di pitture
FT44p	<i>Frigidarium</i>	Arriccio	60	Nessuna
FT45p	<i>Frigidarium</i>	Intonachino	163	Tracce di pitture
FT46p	<i>Frigidarium</i>	Arriccio	163	Nessuna
FT47p	<i>Frigidarium</i>	Intonachino	163	Tracce di pitture
FT48p	<i>Frigidarium</i>	<i>Trullissatio</i>	163	Nessuna
FT49p	<i>Frigidarium</i>	<i>Trullissatio</i>	163	Nessuna
FT50	Muro cortile Est (Terme II)	<i>Trullissatio</i>	70	Patina biologica
FT51	Muro cortile Est (Terme II)	Calcestruzzo pavimentale	15	Patina biologica
FT52s	Cisterna cortile Est (Terme II)	<i>Trullissatio</i>	-40	Nessuna
FT53s	Cisterna cortile Est (Terme II)	<i>Trullissatio</i>	-40	Nessuna
FT54s	Cisterna cortile Est (Terme II)	Arriccio	-40	Nessuna
FT55s	Cisterna cortile Est (Terme II)	Intonachino	-40	Decoesione
FT56a'	<i>Natatio</i>	<i>Trullissatio</i>	70	Nessuna
FT56b'	<i>Natatio</i>	Arriccio	70	Nessuna
FT56a''	<i>Natatio</i>	<i>Trullissatio</i>	70	Nessuna
FT56b''	<i>Natatio</i>	Arriccio	70	Nessuna
FT58a'	<i>Natatio</i>	<i>Trullissatio</i>	162	Nessuna
FT58b'	<i>Natatio</i>	Arriccio	162	Nessuna
FT58a''	<i>Natatio</i>	<i>Trullissatio</i>	162	Nessuna
FT58b''	<i>Natatio</i>	Arriccio	162	Nessuna
FT60	<i>Natatio</i>	Allettamento conci/laterizi	-31	Patina biologica
FT61	<i>Natatio</i>	Allettamento conci/laterizi	-31	Patina biologica
FT62	<i>Natatio</i>	Allettamento conci/laterizi	-58	Patina biologica

Tabella 5.5.2: Log di campionamento delle malte nel Forum Traiani secondo Nor.Ma.L 2/80.

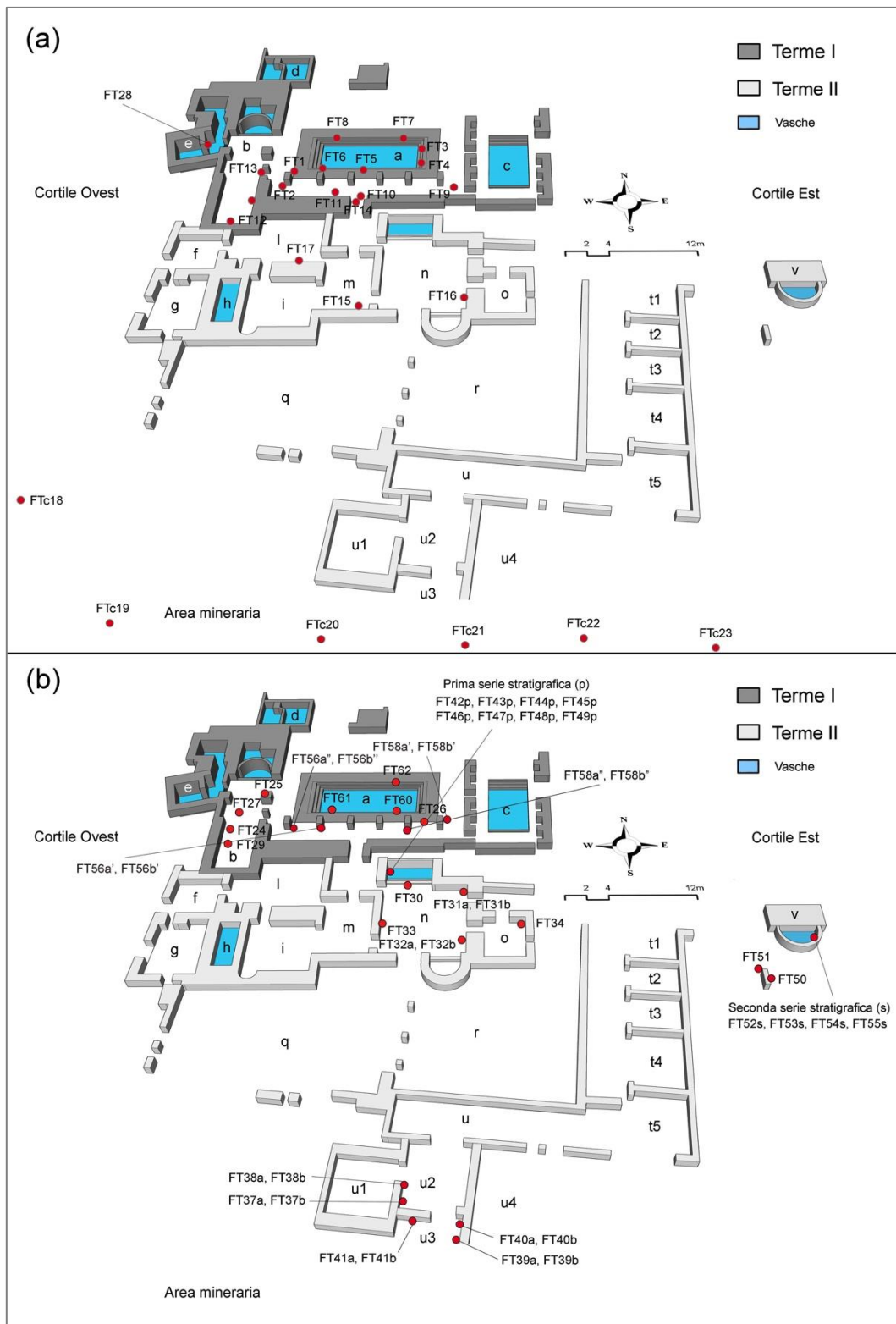


Figura 5.5.1: Campionamento nel Forum Traiani: (a) vulcaniti, (b) malte.

a = *Natatio*, b = *Apodyterium*, c = *Ninfeo*, d = piscina termale, e = vasca di captazione, f-g = fornaci, h = *vasca del Calidarium*, i-l = *Calidarium*, m = *Tepidarium*, n = *Frigidarium*, o = *Apodytaerium*, q = atrio, r = palestra, t1-t2-t3-t4-t5 = *Tabernae*, u1-u2-u3-u4 = strutture abitative, v = cisterna d'acqua.

Elaborazione grafica di Fabio Sitzia.

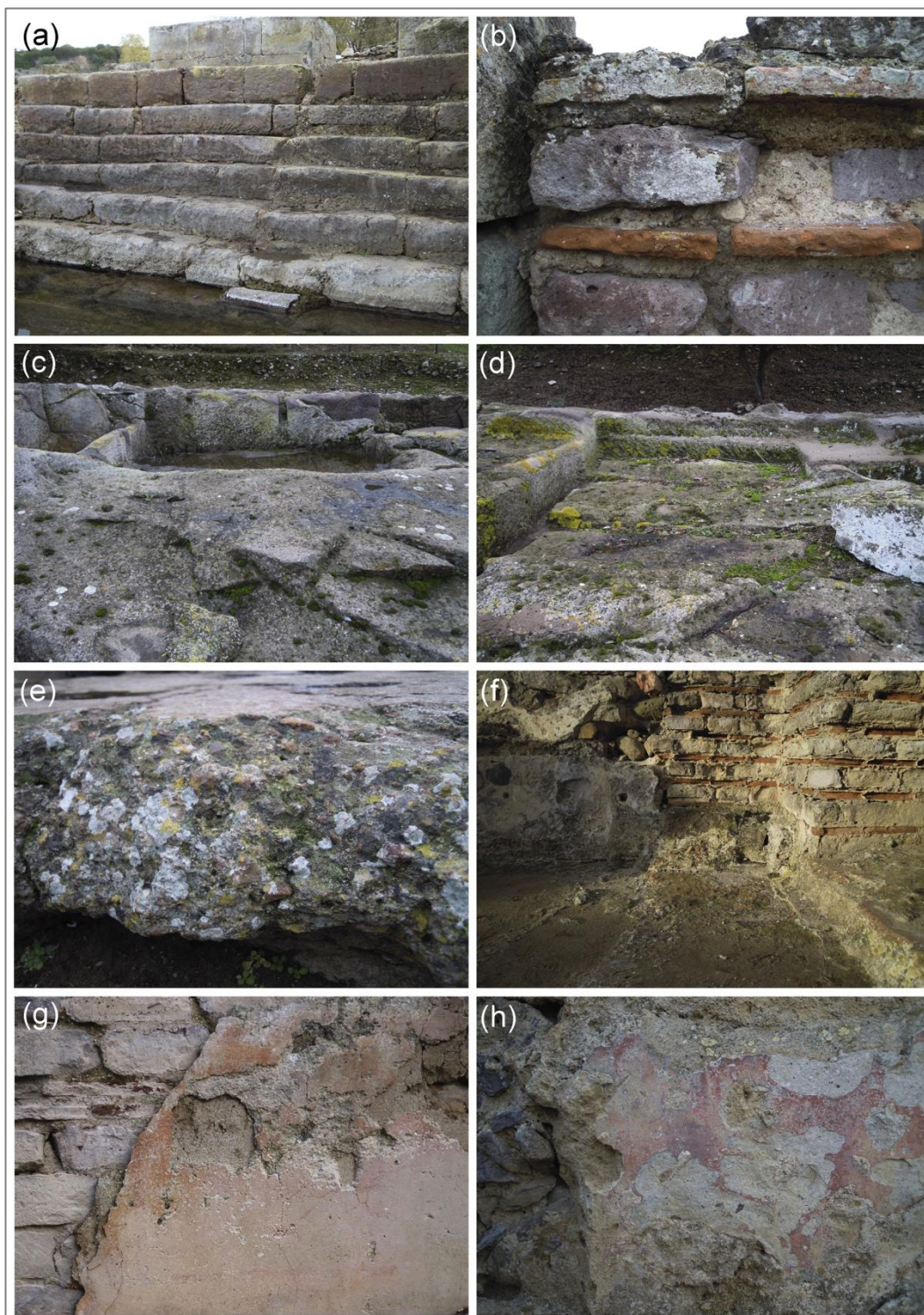


Figura 5.5.2: Campionamento nel Forum Traiani: (a) gradinate in vulcanite locale, (b) concio in vulcanite, (c, d) cava storica, (e) calcestruzzo pavimentale, (f) malta di allettamento dei laterizi, (g, h) arriccio con intonachino affrescato. Foto di Fabio Sitzia.

6.1 Caratterizzazione fisico-meccanica ed analisi granulometriche (PSD, iPSD)

Le caratterizzazioni fisiche sono state condotte su provini cubici di dimensioni $15 \cdot 15 \cdot 15 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ essiccati a $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, su cui è stata determinata la massa secca (m_D) mediante bilancia Sartorius BP301s (tolleranza strumentale di 0,001 g).

Il volume reale ed il volume del solido su polveri (V_R e V_S) degli stessi provini è stato misurato mediante picnometro ad elio UP1000 Quantachrome Instruments (tolleranza $0,001 \text{ cm}^3$). La massa del provino saturo (m_W) è misurata in seguito a 10 giorni di immersione totale ($86,4 \cdot 10^4 \text{ s}$).

Il volume apparente V_B è calcolato con la seguente relazione:

$$V_B = ((m_W - m_{HY}) / \rho_{W25^\circ\text{C}}) 100$$

Dove m_{HY} è la massa idrostatica del provino saturo e $\rho_{W25^\circ\text{C}}$ è la densità dell'acqua ($0,9970 \text{ g/cm}^3$) alla temperatura di $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Le porosità aperta all'acqua e all'elio (Φ_{H_2O} , Φ_{He}) e la porosità chiusa ($\Phi_C He$) sono state calcolate con le seguenti equazioni:

$$\Phi_{H_2O} (\%) = [(m_W - m_D) / \rho_{W25^\circ\text{C}}] / V_B) 100$$

$$\Phi_{He} (\%) = ((V_B - V_R) / V_B) 100$$

$$\Phi_C He (\%) = ((V_R - V_S) / V_S) 100$$

La porosità totale è la somma della porosità aperta all'elio e quella chiusa secondo:

$$\Phi_T (\%) = \Phi_{He} + \Phi_C He$$

La densità apparente, reale e del solido (ρ_B , ρ_R , ρ_S), sono calcolate con le seguenti formule:

$$\rho_B = m_D / V_B (\text{g/cm}^3)$$

$$\rho_R = m_D / V_R (\text{g/cm}^3)$$

$$\rho_S = m_D / V_S (\text{g/cm}^3)$$

Il coefficiente d'imbibizione (CI_W), l'indice di saturazione (S.I.), e l'indice dei vuoti (e) sono invece calcolati come:

$$CI_W (\%) = ((m_W - m_D) / m_D) 100$$

$$S.I. (\%) = (\Phi_{H_2O} / \Phi_{He}) 100$$

$$e = (V_C + V_O) / V_S ()$$

dove: V_C = volume dei pori chiusi, V_O = volume dei pori aperti, V_S = volume del solido.

Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche, la resistenza a punzonamento normalizzata (I_{S50}) è stata determinata sugli stessi provini cubici utilizzati nelle prove precedenti con Point Load Tester (mod. D550 Controls Instrument), di tolleranza strumentale 50 N sulla base delle raccomandazioni ISRM (1972) e ISRM (1985). La resistenza a compressione uniassiale (R_C) e la resistenza a trazione (R_T) sono state calcolate indirettamente utilizzando il valore della resistenza a punzonamento normalizzata I_{S50} ed un coefficiente moltiplicativo K (Palmstrom 1995):

$R_C = K I_{S50}$ (MPa) dove:

$K = 14$ con $I_{S50} < 3,5$ MPa

$K = 16$ con $3,5 < I_{S50} < 6$ MPa

$K = 20$ con $6 < I_{S50} < 10$ MPa

$K = 25$ con $I_{S50} > 10$ MPa

$R_T = I_{S50} / 0,8$ (MPa)

Le analisi granulometriche degli aggregati su setaccio tradizionale (PSD, particle-size distribution) sono state condotte nel modo seguente: campioni di malta di ≈ 100 g ognuno sono stati prima disgregati con l'uso di un mortaio e di un pestello ed il prodotto posto in stufa per 24 h a 105 ± 5 °C. Tale prodotto, pesato per misurare la massa secca (mdM), è stato in seguito dissolto in soluzione acida (HNO_3 13% vol.) per un periodo di immersione di 24 h in modo da eliminare la frazione legante (carbonatica) della malta. La soluzione risultante è stata poi filtrata con carta Whatman 41. Il residuo di dissoluzione (aggregato) è stato lavato in acqua distillata e collocato in forno a 105 ± 5 °C per determinare la massa secca dell'aggregato residuo (mdR) e, indirettamente, la massa del legante mdB ($mdB = mdM - mdR$). Ciò consente di determinare il rapporto legante/aggregato in peso di ciascun campione. Successivamente, la distribuzione dell'aggregato è stata ottenuta utilizzando setacci con apertura maglie di 8000, 4000, 2000, 1000, 500, 250, 125 e 63 μm . Il setacciatore utilizzato è un GIULIANI modello IG3.

Le caratterizzazioni granulometriche con analisi d'immagine (iPSD, particle-size distribution by image) sono realizzate su sezione sottile mediante il software ImageJ 1.51s.

Le sezioni sottili di malta, realizzate su supporto vitreo 4,7x2,8 cm, sono state scannerizzate con foto a risoluzione 1200 dpi, interponendo un cartoncino di colore nero tra sezioni e coperchio di chiusura dello scanner. Questo ha consentito una pre-binarizzazione (Fig. 6.1.1a) cromatica (bianco-nero, b-n) dell'immagine al fine di consentire al software ImageJ un processo di binarizzazione definitiva più semplice. La scelta di riporre il cartoncino nero deriva dal tipo di malta analizzato. Queste ultime presentano generalmente un aggregato di natura quarzoso-feldspatica trasparente in sezione sottile che può essere facilmente attraversato dalla luce dello scanner mostrando il fondo del cartoncino nero (Fig. 6.1.1a). Il processo non avviene invece sul legante poiché questo, non essendo trasparente, non consente il passaggio della luce mantenendo la

sua colorazione bianca. Le fotografie ottenute mediante pre-binarizzazione, come detto in precedenza, vengono definitivamente binarizzate mediante ImageJ. Si ottiene quindi un risultato finale in cui gli aggregati trasparenti sono colorati in nero mentre il legante è di colore bianco (Fig. 6.1.1b).

È importante precisare che i fori, trasparenti alla luce e quindi rilevati dal software come nero, vengono esclusi dai conteggi. I calcinaroli (grumi di calce) sono considerati invece come legante. Eventuali frammenti di aggregato non trasparenti (e.g., *Cocciopesto*, litoclasti), vengono binarizzati manualmente mediante il software Adobe Photoshop CS5. Il rapporto legante/aggregato è fornito dal software ImageJ sulla base della superficie di bianco e nero occupata nella figura. B/A è quindi espresso in superficie e non in peso come viene espresso col metodo della dissoluzione classica in acido. Il software, in analisi d'immagine, fornisce inoltre i dati circa la superficie in mm^2 occupata da ciascun aggregato calcolata sulla base di una scala pre-impostata. L'analisi granulometrica viene quindi condotta considerando la superficie di ciascun aggregato in sezione sottile che può essere pari, maggiore o minore della superficie quadrata del foro di maglia di un setaccio virtuale con dimensioni di 8000 (64 mm^2), 4000 (16 mm^2), 2000 (4 mm^2), 1000 (1 mm^2), 500 ($0,25 \text{ mm}^2$), 250 ($0,0625 \text{ mm}^2$), 125 ($0,015625 \text{ mm}^2$) e $63\mu\text{m}$ ($0,003969 \text{ mm}^2$). Ad esempio, un aggregato di superficie pari a $0,9 \text{ mm}^2$ sarà trattenuto dal setaccio virtuale di 500 ($0,25 \text{ mm}^2$) poiché passante ai setacci virtuali di 8000, 4000, 2000 e 1000 con maglie di apertura 64, 16, 4 e 1 mm^2 .

Una volta rilevate le superfici di ciascun frammento di aggregato, lo si indirizza al relativo setaccio virtuale. È importante quindi sottolineare che il trattenuto ad ogni setaccio virtuale è la sua percentuale numerica rispetto al totale degli aggregati conteggiati, non è perciò espresso in peso come avviene in una setacciatura classica.

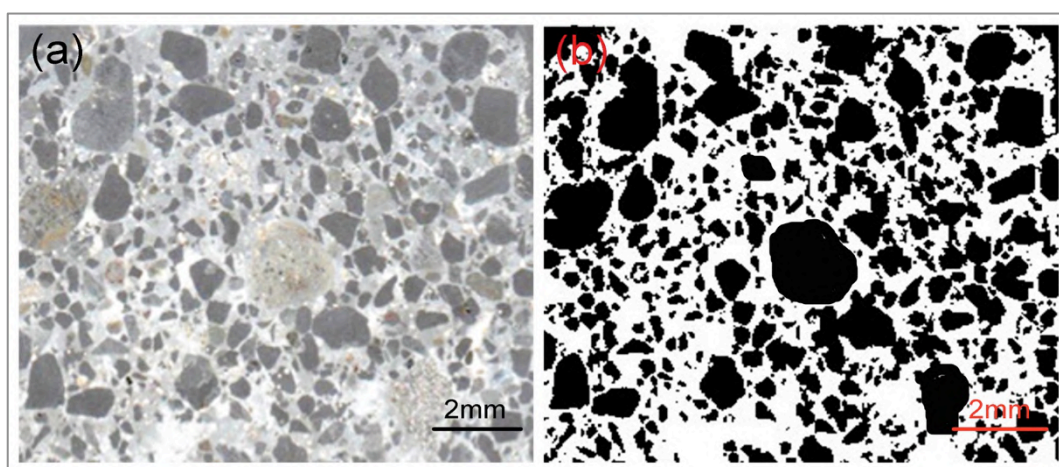


Figura 6.1.1 Distribuzione granulometrica su sezione sottile con analisi d'immagine (iPSD): (a) immagine realizzata con scanner su sfondo nero (pre-binarizzata), (b) immagine binarizzata definitivamente con software ImageJ 1.51s. Il frammento circolare al centro della foto è stato binarizzato manualmente disegnando su di esso una maschera di colore nero poiché nel processo di binarizzazione risultava bianco. Questo avviene normalmente con gli aggregati di *Cocciopesto* e litoclasti, non trasparenti alla luce rispetto all'aggregato di cristallo-clasti.

6.2 Caratterizzazione petrografica

Le determinazioni petrografiche della composizione mineralogica (OM) sono state eseguite su sezioni sottili (spessore 30 μm , supporto vitreo 4,7x2,8 cm) mediante microscopio ottico polarizzatore Leitz Wetzlar.

L'analisi modale su sezione sottile è avvenuta mediante strumento conta-punti (0,1% errore assoluto) su 300 punti per ogni sezione. Nelle malte, il grado di circolarità medio degli aggregati è ricavato mediante osservazione congiunta di tavola sinottica ed analisi di immagine effettuata ancora una volta col software ImageJ 1.51s.

Nelle descrizioni petrografiche e macroscopiche sono forniti dati di colorazione secondo spazio colore CIELAB ricavati con colorimetro di Adobe Photoshop CS5 versione 12.0x64.

6.3 Analisi geochimiche

6.3.1 Diffrazione a Raggi X su polveri (XPRD) e micro-diffrazione (μ -XRD)

La composizione mineralogica dei campioni di malta è stata studiata mediante diffrazione a raggi X su polveri (XPRD).

La diffrazione è condotta utilizzando un diffrattometro Bruker AXS D8 con fonte Cu K_{α} , operante a 40 kV e 40 mA. Lo strumento è provvisto di un detector Lynxeye 1. Le scansioni sono state condotte in un intervallo tra 3 e 75° 2θ , con step di 0,05 2θ e tempo di misura 1s/step. Il software Bruker Diffract-Eva associato ad un database PDF-2 (International Centre for Diffraction Data - ICDD) è stato utilizzato per interpretare lo spettro. Analoghe condizioni strumentali sono state utilizzate per l'analisi dei pigmenti e delle efflorescenze minerali ma con diffrattometro settato in modalità μ -XRD con l'uso di uno specchio Goebel ed un collimatore Laser da 1 mm.

6.3.2 Analisi dei pigmenti parietali con tecniche μ -Raman e μ -FT-IR

Un piccolo campione di pigmento (circa 200 μm di diametro) è stato rimosso meccanicamente dalla malta. L'analisi al μ -Raman è eseguita con uno spettrometro HORIBA XPlora con diodi di 28 mW operativo a 785 nm, associato ad un microscopio Olympus. Lo spettro è stato acquisito in un intervallo tra 100 e 1400 cm^{-1} . Lo strumento è stato calibrato con campione di riferimento in Silicio. Il laser è concentrato con una lente Olympus 50x con 5 s di esposizione, e 5 cicli di accumulazione. I risultati sono stati acquisiti ed interpretati col software LabSPEC5.

La spettroscopia μ -FT-IR è avvenuta nella regione del medio infrarosso (4000 - 650 cm^{-1}), usando un Brüker Hyperion 3000 Tensor 27 equipaggiato con un detector a punto singolo (MCT) raffreddato ad Azoto liquido. Lo spettro è stato ottenuto in transmission mode, usando una cella di compressione S.T. Japan Diamond Anvil. L'interpretazione è avvenuta col software OPUS 7.2 in una risoluzione spaziale di 4 cm^{-1} a 32 scansioni. I risultati ottenuti sono stati confrontati con le referenze bibliografiche (Lafuente et al. 2016) ed il database online RRUFF <http://rruff.info/>.

6.3.3 Analisi termo-gravimetriche e termico-differenziali (TGA-DSC)

I test termo-gravimetrici sui leganti delle malte (TGA) sono stati eseguiti a pressione atmosferica costante utilizzando una bilancia termica Perkin Elmer modello TGA7. Le misurazioni sono state eseguite con flusso di Ar (60 mL/min).

Una massa di 10 mg di campione è stata riposta in crogioli di Platino (Pt) e riscaldata nell'intervallo di temperatura di 30-850 °C con una velocità (Scanning rate) di 10 °C/min.

Lo strumento TGA7 è calibrato con i punti Curie di campioni standard Alumel, Nichel, Perkalloy e Ferro a temperatura ottenuta con una precisione di ± 2 °C.

I test di calorimetria a scansione differenziale (DSC) sono state eseguite a pressione atmosferica costante utilizzando un Perkin Elmer DSC7. La prova è condotta con flusso di Ar (60 mL/min) su campioni di 5 mg collocati in crogioli di Platino Pt. La temperatura di scansionamento consiste in un intervallo 30-650 °C con una velocità di riscaldamento di 10 °C/min. Lo strumento DSC7 è stato calibrato misurando la temperatura di fusione dell'Indio metallico e dello Zinco (99,999% di purezza) e la temperatura è stata ottenuta con una precisione di $\pm 0,5$ °C.

Prima dei test, il legante è stato manualmente separato dall'aggregato mediante l'ausilio di un microscopio stereoscopico Wild Heerbrugg.

6.3.4 Osservazioni in microscopia elettronica e microsonda (SEM-EDS)

Le analisi in microscopia elettronica SEM sono state eseguite mediante microscopio elettronico a scansione SEM-EDS Hitachi 3700n VP con detector Bruker Xflash 5010. Le osservazioni sono realizzate solo su sezione sottile ricavate con metodo di cui in precedenza.

6.3.5 Analisi isotopiche sui marmi

Gli isotopi stabili del carbonio e dell'ossigeno ^{13}C e ^{18}O sono stati misurati mediante spettrometria di massa. Le polveri di marmo sono state fatte reagire con acido fosforico 100% vol. a 7 °C

utilizzando un Gasbench II collegato ad uno spettrometro di massa ThermoFinnigan Five-Plus. Tutti i valori sono riportati in ‰ rispetto a V-PDB assegnando un valore di 1,95 ^{13}C e ^{18}O valore di -2.20 ai materiali di riferimento NBS 19, TS-calcare (Coplen et al. 2006, Friedman et al. 1982). La riproducibilità è stata controllata mediante l'analisi replicata di standard di laboratorio.

I valori degli isotopi dell'ossigeno della dolomite e della siderite sono stati corretti utilizzando i fattori di frazionamento di H_3PO_4 dati da Kim et al. (2007) e Rosenbaum & Sheppard (1986).

Per stabilire la provenienza di marmi, i risultati delle analisi mineralogiche-petrografiche e isotopici sono stati confrontati con la maggior parte dei database up-to-date. (Antonelli et al. 2009, Attanasio et al. 2006, 2009, 2012, Cantisani et al. 2005, Capedri & Venturelli 2004, Ebert et al. 2010, Franzini et al. 2010, Germann et al. 1988). Le principali caratteristiche petrografiche sono state confrontate con quelle indicate per i campioni di riferimento presi da antiche cave nell'area del Mediterraneo (Collezione di L.A.M.A. presso l'Università IUAV di Venezia).

6.4 Rilievo fotogrammetrico e cartografie di degrado

Il rilievo fotogrammetrico dei campioni è stato eseguito mediante fotocamera Nikon D3300 con risoluzione di 24 Mpx, con ottica 18-50 mm f/3.5-5.6 DC D.

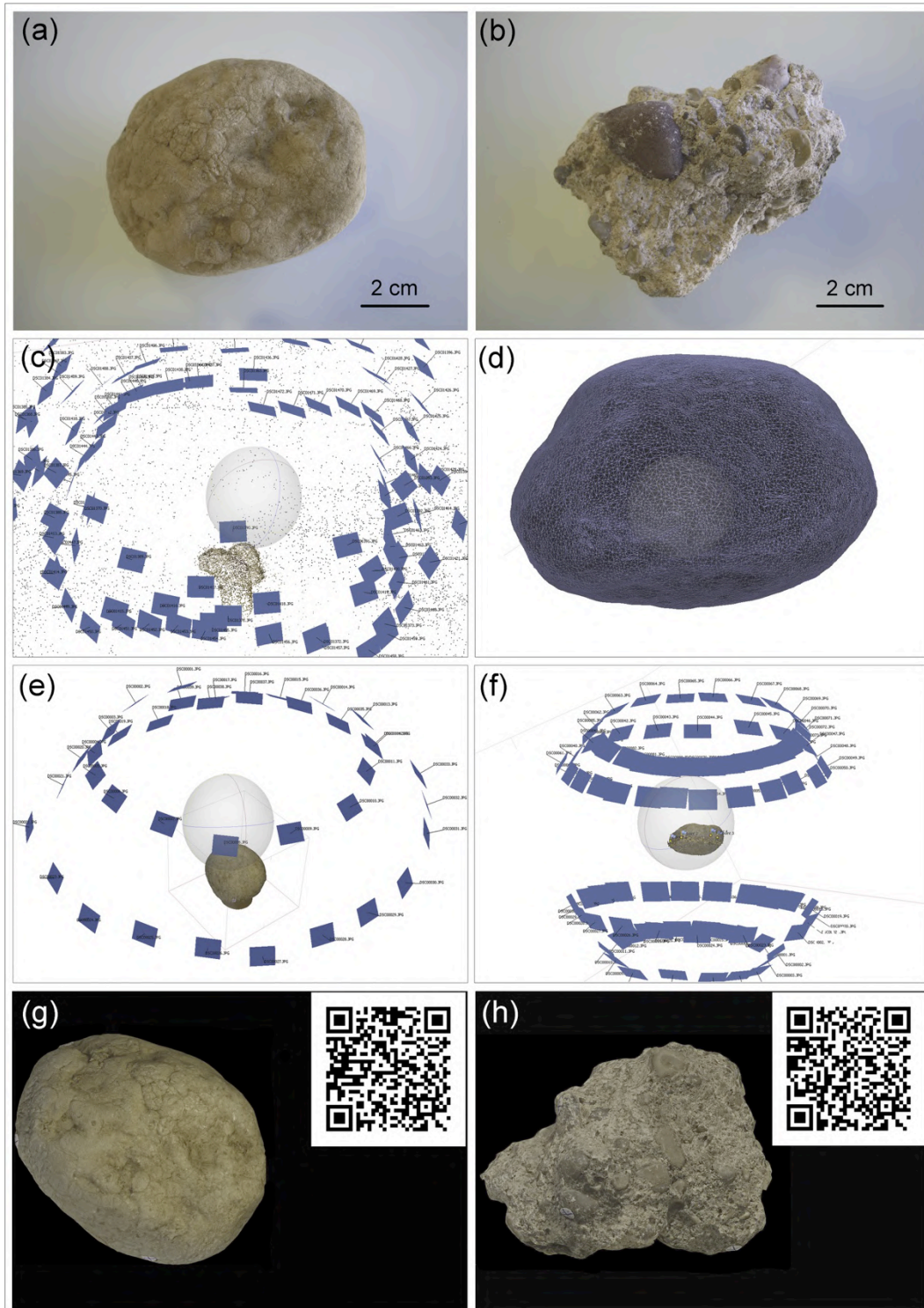


Figura 6.4.1: Ricostruzione fotogrammetrica campioni di prova Ex1, Ex2: (a) calcare Ex1, (b) malta Ex2, (c) ricostruzione della nuvola di punti per il campione Ex1, (d) ricostruzione della maglia poligonale, (e) chunk fotografico superiore (Ex1), (f) chunks fotografici inferiore e superiore (Ex1), (g) modello tridimensionale campione Ex1, (h) modello tridimensionale campione Ex2.

Si riporta come esempio la metodologia utilizzata sui campioni di prova Ex1 ed Ex2 (Fig. 6.4.1a, b). La realizzazione del modello digitale 3D ha comportato la realizzazione di un set di fotografie per un totale di circa 85 foto/campione per 2 gruppi o Chunks (39+46), corrispondenti, uno alla metà volumetrica superiore del campione (Fig. 6.4.1e), uno alla metà volumetrica inferiore (Fig. 6.4.1f).

Le immagini sono state elaborate con un software dedicato di fotogrammetria Photoscan versione 1.0.4 1847 (64bit). L'allineamento delle foto è stato eseguito sulla base di $4 \cdot 10^4$ punti (accuratezza media). La nuvola di punti (Point Cloud, Fig. 6.4.1c), associata alla costruzione del campione, è realizzata ad alta risoluzione. La giunzione dei due Chunks è stata realizzata con un merge ottenuto da 4/5 bersagli fisici applicati fisicamente al campione realizzati con un piccolo adesivo rettangolare o circolare con croce centrale (Fig. 6.4.1d).

È possibile accedere al modello digitale 3D dei campioni direttamente cliccando su un apposito Internet link.

La cartografia del degrado è stata realizzata mediante merge di fotografie realizzate perpendicolarmente alla superficie muraria da analizzare mediante fotocamera Nikon D3300 da 24 Mpx. L'immagine finale viene convertita in scala di grigi e vengono applicati, col software Adobe Photoshop CS5 versione 12.0x64, dei tematismi cromatici relativi ai degradi secondo l'abaco NOR.MA.L 1/88.

6.5 Test di degrado accelerati “aging test” (AAT)

I test accelerati (aging) sono stati condotti con una camera climatica ARALAB FITOCLIMA S600PLH atta al controllo dei parametri temperatura (T), umidità relativa (rH) e contenuto di CO₂.

Il software di controllo FITOLOG 600 ha permesso il settaggio della camera climatica.

Provini “madre” 50x50x50 mm ± 5 mm e 50x50x30 mm ± 3 mm con relativi provini “pilota” di dimensioni minori (vedi Capitolo 13), sono stati disposti in camera FITOCLIMA su teglie in plastica con superficie zigrinata in modo che il campione poggi sulle zigrinature lasciando degli spazi vuoti per consentire all’acqua di risalire più agevolmente durante le prove di risalita capillare. In quest’ultima prova, ai campioni sono stati applicati 12 ml di acqua una volta ogni 24 ore.

Sui provini è stata calcolata la scabrezza lineare J.R.C. mediante profilometro e la relativa quantificazione è avvenuta sinotticamente mediante confronto con scala di Burton.

Le misurazioni della velocità della perturbazione elastica sui provini sono condotte mediante PUNDIT PL200 PROCEQ con trasduttori di diametro 2 cm e frequenza 150 KHz; materiale di accoppiamento: silicone.

I valori di massa del provino durante gli aging test sono ricavati ancora una volta con bilancia Sartorius BP301s con tolleranza strumentale di 0,001 g. Le analisi fisico-meccaniche pre e post aging test sono state condotte con i metodi analoghi a quelli descritti nel Paragrafo 6.1.

I test accelerati (aging) di esposizione a radiazione solare sono stati eseguiti in camera solare SOLARBOX3000 CO.FO.MERGA con filtro a campo spettrale 295-400 nm.

Il luogo standard di riferimento per calcolare l’aging time (T_A) è Miami (USA), coordinate 25°47’16’’N - 80°13’27’’E.

Per la misurazione del colore dei provini in SOLARBOX, campioni di forma per lo più irregolare disposti sulla cella della camera, sono marchiati con un quadrato di 3x3 mm che rappresenta il punto in cui eseguire l’analisi, il colorimetro infatti presenta un sensore circolare di 3 mm di diametro.

Il colorimetro utilizzato è di tipo portatile DATACOLOR check II plus con sistema di riferimento CIELAB-Ch e sensibilità strumentale per C, L, a, b ed h pari a 0,01.

Le Piccole Terme ed il Teatro di Nora: risultati e discussioni

7.1 Caratteristiche petrografiche (OM)

7.1.1 Le malte delle Piccole Terme

Le malte delle Piccole Terme sono caratterizzate da un colore variabile da grigio chiaro (CIELAB 82*2*3) a grigio scuro (CIELAB 55*1*1, Fig. 7.1.1.1).

Possono essere suddivise in due grandi gruppi rappresentati da malte di allettamento di conci di pietra e di laterizi, ed intonaci (rappresentati da arriccio). Macroscopicamente, tutti i campioni mostrano un aspetto da conglomeratico a micro-conglomeratico (Fig. 7.1.1.1).

Il legante è di natura calcitica e presenta grumi di calce (calcinaroli) di dimensioni sino a 2,5 mm in percentuali da 1 a 5% vol. Le fratturazioni da stress meccanico e da ritiro sono assenti e la coesione è buona.

L'aggregato è costituito da cristallo-clasti principalmente quarzoso-feldspatici e subordinatamente mafici, frammenti di rocce magmatiche e sedimentarie (generalmente chiamati litoclasti), *Cocciopesto*, bioclasti e carbone. Quest'ultimo, trattandosi probabilmente di un aggregato accidentale derivante da residui di combustione nel forno di cottura del calcare, è rinvenuto in esigue percentuali ed è assente nella gran parte delle malte campionate. L'analisi in sezione sottile dei frammenti di carbone non è stata possibile nel determinare la specie di origine, a causa dell'elevata alterazione e del poco materiale rinvenuto.

I dati inerenti l'aggregato utilizzato nelle malte sono riportati nella Tab. 7.1.1.1.

Dall'analisi modale in sezione sottile si evince che nelle malte di allettamento di conci/laterizi, l'aggregato è rappresentato principalmente dai cristallo-clasti ialici da 18,5 a 99% sul totale dell'aggregato. Più precisamente, circa il 70% è costituito da quarzo (in alcuni casi ialino), circa il 25% da K-feldspati e circa il 5% da plagioclasti (Fig. 7.1.1.2a). Entrambe le fasi K-feldspato e plagioclastio mostrano evidenti alterazioni in minerali argillosi (Fig. 7.1.1.2c). Le dimensioni dei cristallo-clasti sono variabili da 0,1 a 6 mm con forme di solito ben arrotondate ($0,5 < C < 0,7$), dove con "C" si intende il parametro circolarità.

I cristallo-clasti (2,8% in media) di tipo mafico consistono prevalentemente in opachi sub-millimetrici riconducibili a magnetite e rara biotite.

Una considerevole frazione di aggregato è rappresentata da frammenti di roccia di tipo magmatico (e.g., andesiti, daciti, riocaciti e granitoidi, Fig. 7.1.1.2b, d) e da rocce sedimentarie rappresentate da siltiti, arenarie siltose ed arenarie Tirreniane.

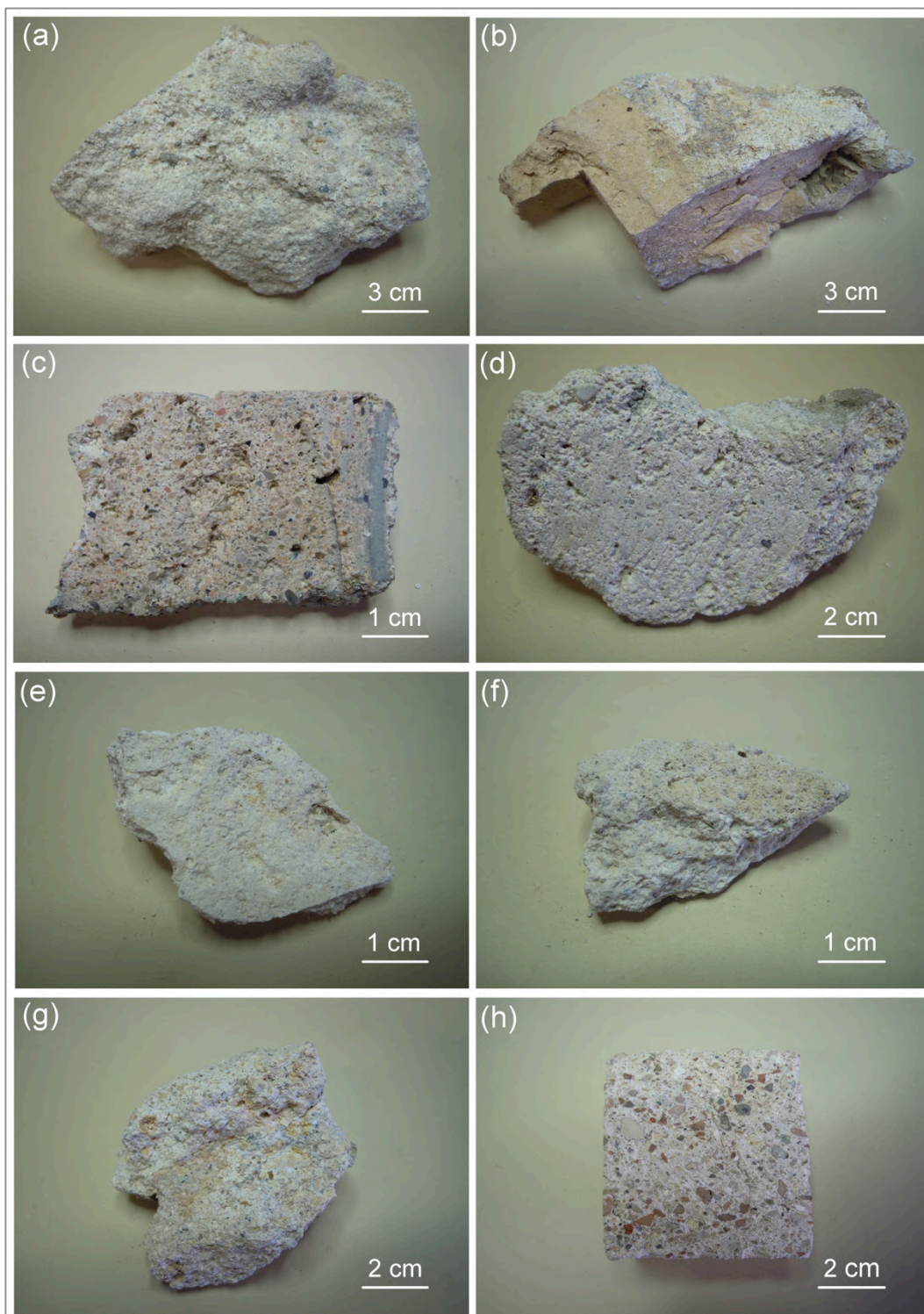


Figura 7.1.1.1: Caratteristiche macroscopiche malte delle Piccole Terme: (a) malta di allettamento dei conci/laterizi MP25, (b) malta di allettamento dei conci/laterizi MP28, (c) malta di allettamento dei conci/laterizi MP10, (d) malta di allettamento dei conci/laterizi MP6, (e) arriccio MP8, (f) arriccio MP5, (g) arriccio MP12, (h) arriccio MP21.

Il rapporto tra aggregati di roccia magmatica e sedimentaria è variabile da campione a campione (Tab. 7.1.1.1). Gli aggregati di roccia magmatica rappresentano mediamente il 14% sul totale dell'aggregato con variabilità da 0 sino a 69,5%.

Gli aggregati di roccia sedimentaria rappresentano mediamente il 13,4% del totale dell'aggregato con variabilità da 0 a 40,2% (Tab. 7.1.1.1). Le dimensioni degli aggregati di frammenti di roccia sono estremamente variabili in un range da sub-millimetrico a centimetrico con circolarità $C < 0,3$. Si notano dei rari bordi di reazione tra frammenti di rocce magmatiche e legante calcitico.

Nelle malte di allettamento, una percentuale di aggregato media di 0,9% consiste in frammenti di *Cocciopesto* con forme spigolose ($C < 0,3$) e dimensioni di solito intorno al millimetro. Il *Cocciopesto* non mostra bordi di reazione con il legante carbonatico ma solo dei bordi di carbonatazione all'interfaccia col legante calcitico.

I bioclasti sono assenti in diversi campioni; in altri campioni (e.g., MP29) presentano un contenuto pari a 13,7%. Solitamente sono attribuibili a bivalvi, gasteropodi, echinidi, foraminiferi, alghe coralline ed altri difficilmente identificabili in sezione sottile a causa della loro ridotta dimensione.

L'aggregato degli strati di arriccio è costituito principalmente da cristallo-clasti di composizione quarzoso-feldspatica. Questi sono rappresentati per circa il 71% da quarzo in alcuni casi ialino, circa il 22% di K-feldspati e circa il 7% plagioclasti.

I cristallo-clasti sialici presentano percentuali variabili da un minimo del 27,6% ad un massimo di 75,3%. Le loro dimensioni sono variabili da 0,1 a 3 mm con forme prevalentemente sub-arrotondate ($0,5 < C < 0,7$). Parte dei cristallo-clasti (1,1% in media), è di tipo mafico, costituito da opachi sub-millimetrici riconducibili a magnetite e rara biotite.

Come nelle malte di allettamento, un'altra considerevole frazione di aggregato (in media il 24,6%) è rappresentata da frammenti di roccia magmatica (e.g., andesiti, daciti, rioclasti e granitoidi).

Nei campioni di arriccio, gli aggregati di rocce sedimentarie, quali arenarie Tirreniane ed in alcuni rari casi siltite ed arenarie siltose (Fig. 7.1.2.1h), hanno una percentuale inferiore rispetto agli aggregati di roccia magmatica (6,7% vs 24,6% rispettivamente, Tab. 7.1.1.1).

Differentemente dalle malte di allettamento, nei campioni di arriccio si rileva una presenza di *Cocciopesto* relativamente elevata in percentuali variabili tra 0 e 40,5% con media di 16,4%. Tale aggregato ha di solito dimensioni sub-millimetriche con circolarità $C < 0,3$ (Fig. 7.2.1e).

Anche nei campioni di arriccio, il *Cocciopesto* non presenta scambio chimico aggregato-legante ma solamente bordi di carbonatazione come quello ben visibile in Fig. 7.2.1g.

La componente fossilifera nei campioni di arriccio (Fig. 7.2.1f), è presente in percentuali variabili da 1,6 a 4,9% con bioclasti rappresentati da bivalvi, gasteropodi, echinidi, foraminiferi, alghe coralline ed altri non identificabili.

La caratterizzazione petrografica delle malte e le osservazioni sull'aggregato forniscono un quadro chiaro circa il tipo e la provenienza delle materie prime utilizzate nella produzione.

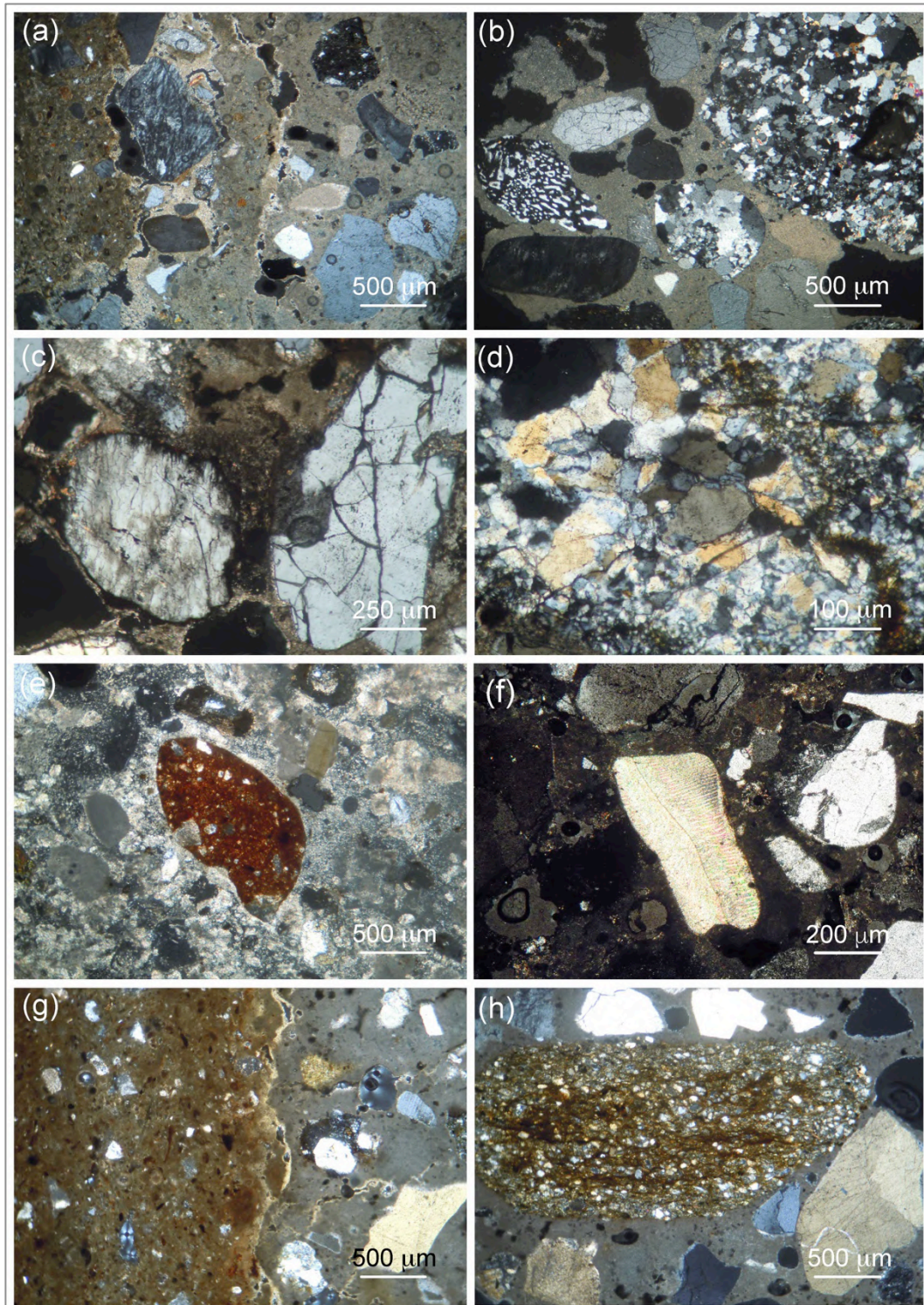


Figura 7.1.1.2: Malte delle Piccole Terme in sezione sottile: (a) cristallo-clasti quarzoso-feldspatici nel campione MP28, (b) aggregati di quarzo e granitoidi in MP10, (c) cristallo-clasto di K-feldspato alterato in minerali argillosi, campione MP28, (d) frammento di granitoidi nel campione MP6, (e) aggregato di *Cocciopesto* in MP9, (f) bioclasto in MP9, (g) aggregato di *Cocciopesto* con bordo di carbonatazione (campione MP12), (h) frammento di siltite in MP21.

L'aggregato di rocce sedimentarie è stato ottenuto dalla macinazione di arenaria locale di età Tirreniana (0,08-0,1 Ma) presente, come anche specificato nel Capitolo 3, in alcuni piccoli affioramenti costieri localizzati in località *Fradis Minoris* a 500 metri ad Ovest della penisola di Nora, in uno scoglio divisorio tra la spiaggia di Sant'Efisio e Su Guventeddu ed in alcune zone in

località Porto Foxi.

Campione	Funzione	Litoclasti magmatici	Litoclasti sedimentari	Bioclasti	<i>Cocciopesto</i>	Cristallo-clasti sialici	Cristallo-clasti mafici	Carbone
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
MP1		30,0	25,2	2,5	2,4	38,8	1,0	0,1
MP2		13,1	13,3	4,7	0,0	66,3	2,6	0,0
MP3		69,5	9,3	1,4	0,0	18,5	1,3	0,0
MP6		20,3	11,7	4,1	0,0	63,4	0,5	0,0
MP10		10,1	20,2	0,1	4,7	64,1	0,9	0,0
MP15		21,7	28,8	2,8	6,2	35,2	5,3	0,0
MP16		21,2	27,4	3,9	6,0	33,8	7,7	0,0
MP17		19,4	11,6	4,6	0,0	56,4	8,0	0,0
MP25		11,8	9,3	3,4	0,0	75,1	0,4	0,0
MP28		0,0	40,2	4,5	0,0	52,9	2,4	0,0
MP29		15,7	22,2	13,7	0,0	45,6	2,8	0,0
MP30		17,9	15,9	8,3	0,0	55,3	2,6	0,0
MP31		0,0	15,0	0,0	0,0	82,2	2,8	0,0
MP33		0,0	0,0	0,0	0,0	99,0	1,0	0,0
MP34		29,5	7,1	0,0	0,0	54,5	6,9	2,0
MP35		0,0	0,0	0,0	0,0	98,7	1,3	0,0
MP38		5,6	4,4	0,0	0,0	86,9	3,1	0,0
MP41		8,9	6,0	0,0	0,0	80,5	4,6	0,0
MP43		7,3	5,8	0,0	0,0	84,0	2,9	0,0
MP44		7,0	7,0	0,0	0,0	82,9	3,1	0,0
MP46		0,0	0,0	0,0	0,0	98,0	0,3	1,7
MP47		0,0	14,4	0,0	0,0	84,8	0,8	0,0
MP4		12,7	15,4	3,1	0,0	67,2	1,6	0,0
MP5		18,8	0,0	1,6	14,3	64,2	1,1	0,0
MP8		38,5	20,5	2,0	0,0	38,3	0,7	0,0
MP9		33,3	0,0	2,7	9,9	53,9	0,2	0,0
MP12		9,8	10,6	4,7	10,0	62,2	2,7	0,0
MP13		7,1	0,0	4,9	10,2	75,3	2,5	0,0
MP14		50,5	10,7	2,4	8,6	27,6	0,2	0,0
MP21		20,3	10,2	3,3	35,8	28,3	2,1	0,0
MP22		40,3	6,1	3,1	11,4	39,0	0,1	0,0
MP23		20,5	0,0	4,7	40,5	33,2	1,1	0,0
MP27		18,7	0,0	3,8	40,0	37,5	0,0	0,0
	Allettamento conci/laterizi							
	Arriccio							

Tabella 7.1.1.1: Analisi modale degli aggregati presenti nelle malte delle Piccole Terme espressi in percentuale sul totale aggregato.

Da precisare che tale roccia, anche a causa della sua buona segabilità e facilità di lavorazione è utilizzata nello stesso edificio termale ed in altri dell'area archeologica per la realizzazione dei conci murari.

Tracce di attività estrattiva di questa pietra sono tuttora visibili nella località di *Fradis Minoris*. La cava è ubicata presso una berma rocciosa che divide il mare aperto dalla laguna di Nora; ha grosse dimensioni e si estende per una superficie complessiva di 12000 m² in cui si osservano 13 fronti estrattivi, 9 dei quali rivolti verso mare nella zona meridionale della penisola, e altri 3 invece si affacciano sulla laguna (Previato 2016).

Nella località di Su Guventeddu non si rileva un vero e proprio fronte di coltivazione di arenaria

Tirreniana ma solo la presenza di blocchi lavorati e squadrati a bordo spiaggia. È tuttavia possibile che con l'avanzamento della linea di costa il fronte di cava si trovi immerso a profondità relativamente bassa (Previato 2016).

Le arenarie siltose e le siltiti utilizzate nelle malte come litoclasti appartengono alla formazione del Cixerri (Eocene Medio 48,6-37,2 Ma), la cui cava di estrazione, si trova in località "Sa Perdera" (Melis & Columbu 2000, Finocchi 2003). L'aggregato di questo tipo di roccia potrebbe rappresentare uno scarto delle attività di lavorazione in cava.

L'aggregato di rocce magmatiche, rappresentato da andesiti, daciti, riodaciti, granitoidi è anch'esso di provenienza locale. Le andesiti, daciti e riodaciti sono rappresentate dal tematismo 19a come prodotto appartenente al primo ciclo vulcanico della Sardegna occorso tra l'Eocene Superiore ed il Miocene (38-15 Ma), come mostra la cartografia geologica di Fig. 3.1.1 (Capitolo 3).

Nell'agro di Pula tali prodotti sono presenti in almeno 13 differenti centri vulcanici di emissione quali, ad esempio, il M. Santa Vittoria, l'isola di San Macario, il Coltellazzo, M. Agumu, M. Su Casteddu, Su Guventeddu ed il promontorio di S. Efisio il quale risulta essere il più vicino all'area archeologica.

In quest'ultimo, le tracce di attività estrattiva non sarebbero evidenti tuttavia, secondo Previato (2016), una conformazione irregolare nella parte occidentale dell'apparato vulcanico, suggerirebbe un qualche intervento di natura antropica. Sono invece incerti le tracce estrattive situate presso il M. Santa Vittoria, dove due versanti appaiono strutturati a gradoni, con tagli rettilinei di natura artificiale. Non è chiaro se tali evidenze siano l'esito di attività estrattiva o d'interventi di regolarizzazione della cima della collina.

Risultano invece concrete le possibilità che i frammenti di dacite e riodacite possano provenire da M. Casteddu che presenta litotipi ad analogo chimismo e dove sono evidenti tracce di coltivazione antica, in accordo con i risultati delle indagini prima degli autori Melis & Columbu (2000), poi Garau (2005) e Columbu (2018). Questi ultimi hanno evidenziato una stretta correlazione geochimica tra i litotipi utilizzati nella costruzione delle gradinate del Teatro (e anche in altri settori della città di Nora e.g., lastricati e stipiti, Columbu 2018) e quelli di M. Casteddu (noto semplicemente come Su Casteddu, vedi in seguito). Qui, il trasporto del materiale dalla cava al sito di Nora avveniva, per un tratto iniziale, per via terrestre e poi per via marina. Gli stessi autori sopra citati, infatti, ipotizzano che durante i mesi invernali il livello dell'acqua nel Rio Pula, caratterizzato da un regime torrentizio e prossimo alla cava, fosse sufficiente al trasporto dei materiali per via marina.

Il materiale sarebbe stato dapprima trasportato dalla cava alle pendici del M. Su Casteddu, in prossimità del fiume dove sarebbe stato poi caricato su imbarcazioni realizzate in legno, e dopo

aver raggiunto la foce del Rio Pula si sarebbe raggiunta Nora che distava circa 3 Km Ovest in linea d'aria.

L'aggregato di rocce granitoidi proviene invece da formazioni locali appartenenti al basamento varisico del Carbonifero Superiore (Fig. 3.1.1) tematismo 31, 32.

Nell'area di Nora, questa litologia si rinviene in piccoli frammenti come "sabbione" prodotto di disgregazione della roccia madre, i cui conoidi alluvionali provenienti dai rilievi posti a Nord-Ovest di Nora, occupano l'intera fascia pedemontana spingendosi in certi casi in prossimità della linea di costa.

Per quanto riguarda i cristallo-clasti di aggregato s'ipotizza che questi possano provenire dai locali arenili che circondano l'area archeologica sulla base della presenza in sezione sottile di bioclasti marini (e.g., alghe coralline).

Non si hanno invece informazioni circa la materia prima calcarea utilizzata nella produzione di legante. È probabile che il calcare fosse trasportato per via marina dalla città di *Karalis*, attuale Cagliari. A *Karalis* è stata infatti testimoniata attività mineraria già in periodo Romano sulle formazioni calcaree locali di pietra Cantone e pietra Forte (Coroneo 1993).

Tali giacimenti calcarei sono stati utilizzati nella produzione di malte destinate ad altri siti Romani come la Basilica di San Saturnino (Coroneo 1993, vedi Capitolo 8).

In aggiunta è probabile che il legante per la produzione delle malte di Nora fosse prodotto dalla cottura di roccia calcarea di riutilizzo (e.g., marmi o altri calcari presenti nel sito) appartenenti a insediamenti precedenti come spesso accadeva nel periodo Romano (Cagnana 2000).

7.1.2 Le vulcaniti di Monte Su Casteddu

Le daciti e, subordinatamente, le riodaciti di M. Casteddu sono state utilizzate come conci nella costruzione delle gradinate del Teatro di Nora e come aggregato per la produzione di malte.

Sono caratterizzate da una colorazione grigio-violacea in spazio colore CIELAB 47*10*-1 (Fig. 7.1.2.1).

Macroscopicamente presentano una struttura brecciata di tipo autoclastico con presenza caotica di clasti lavici con diametri da 1 a 30 cm e gradi di circolarità $C > 0,5$ immersi in una matrice lavica più vetrosa, a composizione tendenzialmente dacitica e caratterizzata da un più basso grado di saldatura rispetto agli stessi clasti.

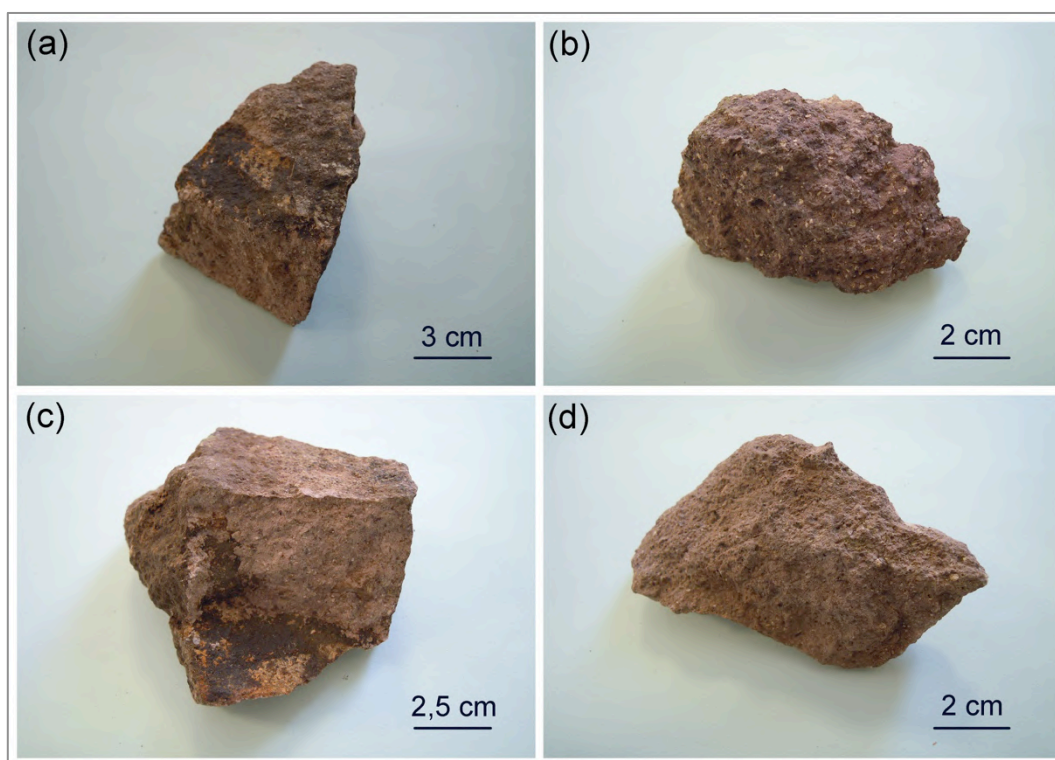


Figura 7.1.2.1: Campioni di dacite/riodacite prelevati a M. Casteddu (Pula).

Come anche rilevato da Garau (2005), questo tipo di struttura favorisce nella roccia un'alterazione differenziale dovuta essenzialmente alle differenti caratteristiche fisico-meccaniche della matrice vetrosa e dei clasti. Questi infatti, presentano una resistenza meccanica maggiore rispetto alla matrice vetrosa per cui sotto l'azione del degrado atmosferico si verifica una enucleazione degli stessi clasti.

In sezione sottile la roccia presenta indici di porfiricità $5 < I.P. < 8$ per fenocristalli di opachi, plagioclasio, pirosseno ed orneblenda. I minerali opachi identificati sulla base della loro forma geometrica circolare e tozza sono riconducibili a magnetite e titano-magnetite.

I plagioclasti della prima paragenesi hanno dimensioni variabili tra 0,5 e 1,5 mm con habitus da euedrale a subedrale, alcune volte zonati ed alterati in minerali argillosi. I plagioclasti appartenenti alla paragenesi più superficiale mostrano invece dimensioni tra 0,05 e 0,15 mm con habitus anche in questo caso da euedrale a subedrale.

Tra i fenocristalli si trovano anche clinopirosseni ed ortopirosseni con habitus anedrale spesso di difficile identificazione a causa dell'avanzato stato di alterazione. Le dimensioni di questi minerali vanno da 0,5 a 1 mm (Fig. 7.1.2.2d).

Gli anfiboli sono rappresentati da orneblende brune (Fig. 7.1.2.2c), con dimensioni simili a quelle del plagioclasio ed habitus euedrale. Gli individui sono interessati da una modesta alterazione ed alcune volte si presentano con bordi opacitici. La pasta di fondo ha una struttura orientata di tipo fluidale ialopilitico (Fig. 7.1.2.2a, b), costituita da microcristalli di plagioclasti, pirosseno, anfiboli e quantità di vetro variabili. Le caratteristiche della roccia rilevate in sezione sottile ed in osservazioni macroscopiche collimano con i dati rilevati da Columbu (2018).

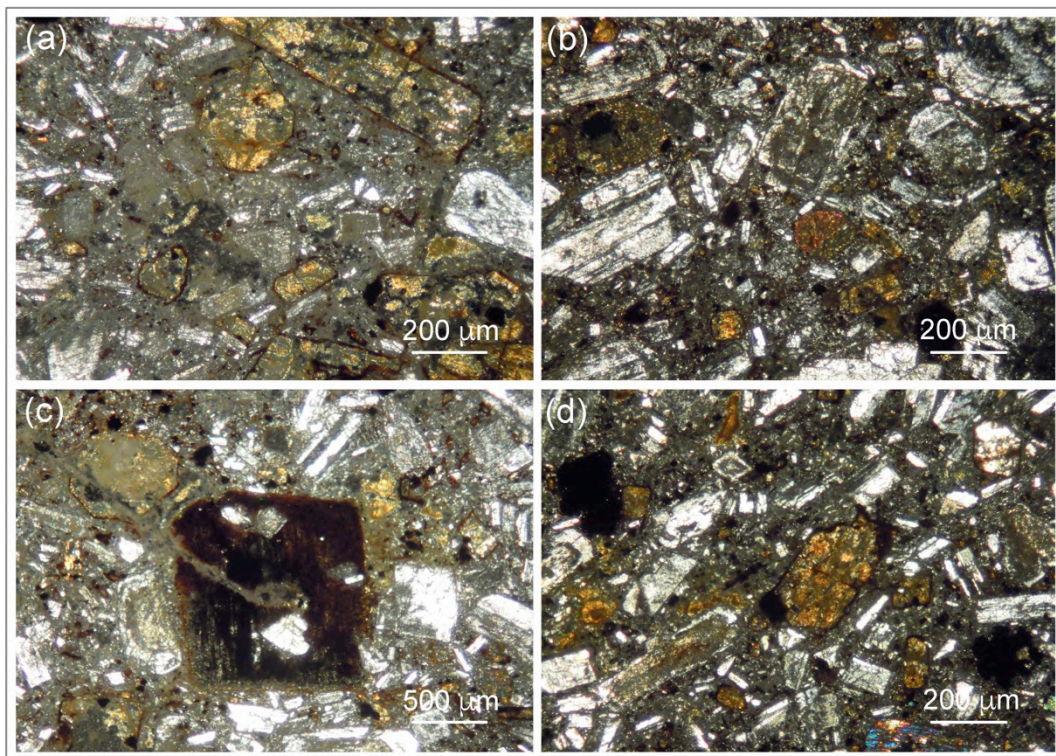


Figura 7.1.2.2: Caratteristiche microscopiche dei campioni di dacite/riodacite prelevati a Monte Su Casteddu (Pula): (a, b) tessitura di tipo ialopilitico, (c) fenocristallo millimetrico di orneblenda bruna, (d) fenocristalli di clinopirosseni e plagioclasti.

7.3 Proprietà fisico-meccaniche delle malte

I risultati ottenuti attraverso la caratterizzazione fisico-meccanica delle malte delle Piccole Terme sono riportati in Tab. 7.3.1 e Fig. 7.3.1.

In queste, si nota una densità reale abbastanza simile tra malte di allettamento e campioni d'intonaco arriccio, rispettivamente di $2,62 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$ vs $2,60 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$. Tali piccole differenze di densità reale fra i due gruppi sono dovute al tipo di legante, al tipo/percentuale di aggregato utilizzato o a volumi diversi di porosità chiusa (che nel calcolo della densità reale viene conteggiata, vedi Capitolo 6).

A parità di chimismo del legante, sempre di tipo carbonatico come da osservazioni OM, (vedi Paragrafo 7.1), e a parità di porosità chiusa, tale differenza di densità tra i due gruppi è probabilmente dovuta ad una più alta percentuale di *Cocciopesto* nei campioni di arriccio rispetto alle malte di allettamento (Tab. 7.1.1).

Il *Cocciopesto*, che presenta solitamente una densità reale media di $2,5 \text{ g/cm}^3$, fu frequentemente utilizzato come aggregato per via delle sue ottime capacità pozzolaniche, consentendo, inoltre, un alleggerimento dei calcestruzzi con spessori importanti (e.g., volte).

Differenze marcate fra i due gruppi sono rilevate nella densità apparente e nei coefficienti d'imbibizione dove, rispettivamente si ha, per le malte di allettamento: $\rho_B = 1,8 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$ e $CI_w = 20,1 \pm 3,17\%$, e per i campioni di arriccio: $\rho_B = 1,79 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$ e $CI_w = 24,4 \pm 3,00\%$, (Tab. 7.3.1, Fig. 7.3.1b, c). Per quanto riguarda i coefficienti d'imbibizione, in Fig. 7.3.1a è stato realizzato un diagramma che mette questi ultimi a confronto con il contenuto di umidità *in situ* (U). I campioni mostrano una scarsa correlazione con coefficiente di correlazione polinomiale piuttosto basso ($R^2 = 0,12$), ad indicare che l'umidità *in situ* non è proporzionale al coefficiente d'imbibizione ma è probabilmente legata alla posizione del campione nella struttura e alla sua conseguente esposizione al vento e al sole.

La porosità aperta all'elio (Tab. 7.3.1, Fig. 7.3.1c), è pari a $43 \pm 4,31\%$ nelle malte di allettamento e $45,6 \pm 3,57\%$ nei campioni di arriccio. Come da Fig. 7.3.1c è inoltre debolmente correlata con la densità apparente con un coefficiente $R^2 = 0,53$.

Il minor valore di porosità aperta all'elio nelle malte di allettamento rispetto ai campioni di arriccio è dovuto probabilmente ad una compattazione nei primi mediante mazza battente con cui il costruttore assicurava i conci già durante la posa. Nelle malte che venivano applicate su parete verticale, come il caso degli strati di arriccio degli intonaci, la compattazione era invece molto minore poiché il costruttore procedeva ad una corretta stabilizzazione e rasatura della malta con la sola pressione manuale.

L'indice di saturazione è più elevato nei campioni di arriccio ($95,5 \pm 3,44\%$) rispetto alle malte di allettamento ($85,9 \pm 11,46\%$, Tab. 7.3.1), probabilmente a causa di differenti tortuosità e raggio dei pori fra i due gruppi di malta.

Tra le malte analizzate di entrambi i gruppi, due campioni, MP41 ed MP46 (Tab. 7.3.1, Fig. 7.3.1d), presentano un indice di saturazione $> 100\%$. Ciò indicava che probabilmente questi campioni presentavano delle fasi igroscopiche in seguito confermate mediante la diffrazione a Raggi X (XPRD), che mostrava la presenza di sali (e.g., NaCl) e minerali argillosi fortemente igroscopici quale la caolinite (vedi Paragrafo 7.5).

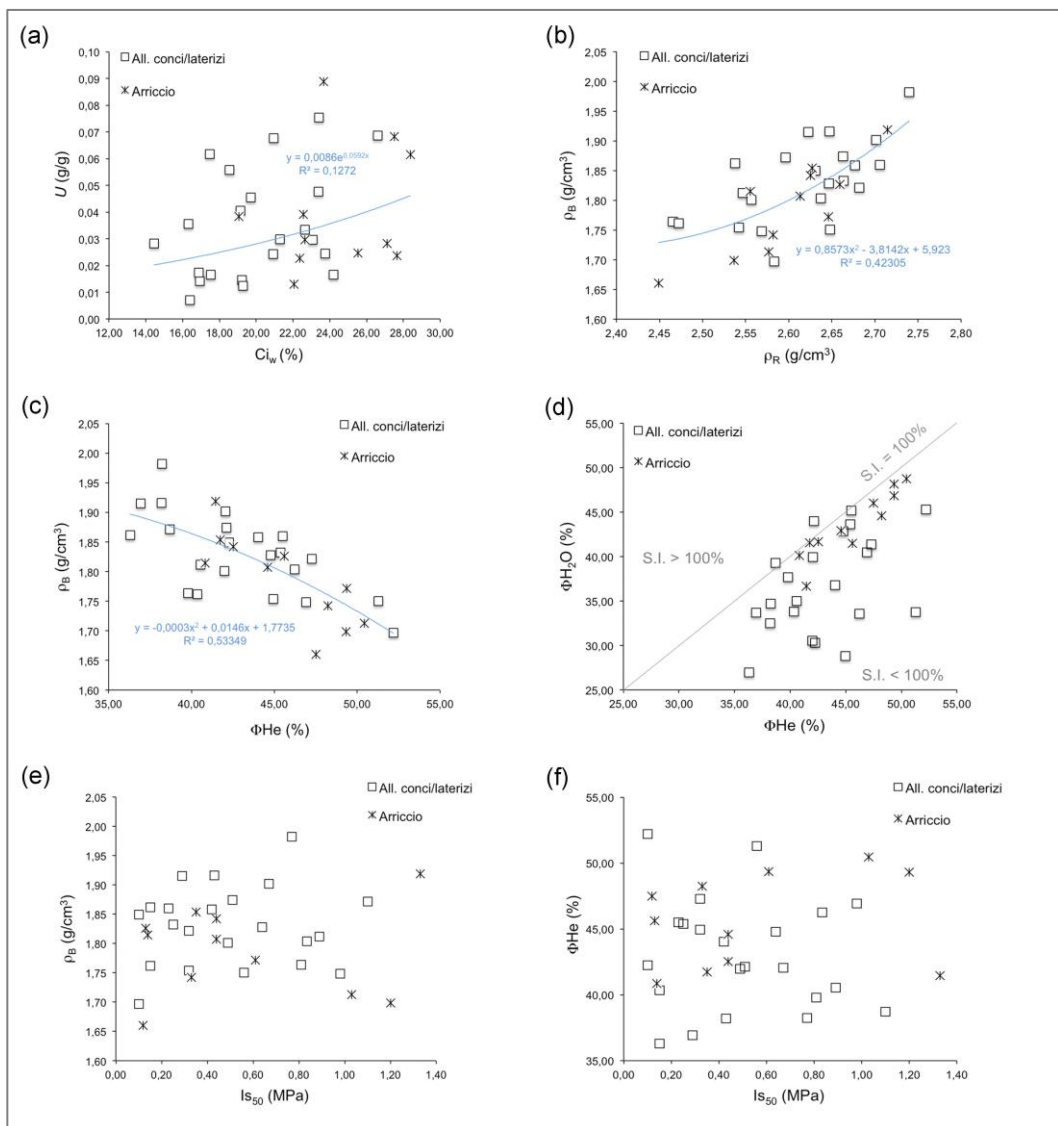


Figura 7.3.1: Caratterizzazione fisico-meccaniche sulle malte delle Piccole Terme: (a) coefficiente d'imbibizione vs contenuto di umidità *in situ*, (b) densità reale vs densità apparente, (c) porosità aperta all'elio vs densità apparente, (d) porosità aperta all'elio vs porosità aperta all'acqua, (e) indice di resistenza al punzonamento vs densità apparente, (f) indice di resistenza al punzonamento vs porosità aperta all'elio.

Per quanto concerne le caratteristiche meccaniche delle malte, da Tab. 7.3.1 si evidenziano valori più elevati dell'indice di resistenza al punzonamento (I_{S50}) nei campioni di arriccio rispetto alle malte di allettamento, ovvero: $0,56 \pm 0,44$ MPa vs $0,5 \pm 0,30$ MPa, rispettivamente.

La differenza di resistenza meccanica tra i due gruppi non sembra essere legata alla porosità aperta all'elio e alla densità apparente poiché, come da Fig. 7.3.1e, f, è evidente una caotica sovrapposizione delle popolazioni dei campioni con coefficienti di correlazione tra i parametri Φ_{He} e ρ_B vs I_{S50} estremamente bassi.

Campione	Funzione	Umidità	Densità	Densità	Coefficiente	Porosità	Porosità	Indice di	Resistenza a	
		<i>in situ</i>	reale	apparente	d'imbibizione	aperta all'elio	aperta all'acqua	saturazione	punzonamento	
		U	ρ_R	ρ_B	CI_w	Φ_{He}	Φ_{H_2O}	S.I.	I_{S50}	
		(g/g)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(MPa)	
MP1	Malte di allettamento dei concii/laterizi	0,03	2,47	1,76	21,29	39,78	37,65	94,65	0,81	
MP2		0,06	2,64	1,80	18,55	46,24	33,54	72,54	0,84	
MP3		0,01	2,65	1,75	19,22	51,28	33,73	65,77	0,56	
MP6		0,01	2,54	1,75	16,40	44,94	28,84	64,16	0,32	
MP10		0,02	2,62	1,92	17,53	36,94	33,67	91,15	0,29	
MP15		0,04	2,63	1,85	16,33	42,25	30,27	71,64	0,10	
MP16		0,07	2,58	1,70	26,62	52,20	45,30	86,78	0,10	
MP17		0,02	2,71	1,86	24,22	45,50	45,16	99,25	0,23	
MP25		0,02	2,66	1,83	23,74	45,38	43,62	96,11	0,25	
MP28		0,03	2,54	1,86	14,44	36,29	26,96	74,29	0,15	
MP29		0,04	2,47	1,76	19,14	40,36	33,81	83,78	0,15	
MP30		0,01	2,65	1,92	16,93	38,19	32,52	85,13	0,43	
MP31		0,05	2,68	1,86	19,72	44,04	36,75	83,45	0,42	
MP33		0,07	2,70	1,90	20,95	42,05	39,95	95,00	0,67	
MP34		0,03	2,68	1,82	22,64	47,27	41,34	87,46	0,32	
MP35		0,06	2,74	1,98	17,47	38,22	34,72	90,83	0,77	
MP38		0,05	2,65	1,83	23,38	44,77	42,85	95,71	0,64	
MP41		0,08	2,66	1,87	23,41	42,11	43,99	104,46	0,51	
MP43		0,02	2,56	1,80	16,89	41,98	30,51	72,66	0,49	
MP44	0,01	2,55	1,81	19,28	40,56	35,02	86,35	0,89		
MP46	0,02	2,60	1,87	20,91	38,70	39,25	101,41	1,10		
MP47	0,03	2,57	1,75	23,08	46,92	40,46	86,23	0,98		
Media aritmetica		0,03	2,62	1,83	20,10	43,00	36,81	85,86	0,50	
Deviazione standard		0,02	0,07	0,07	3,17	4,31	5,50	11,46	0,30	
MP4	Malte d'intonaco: arriccio	0,07	2,54	1,70	27,50	49,32	46,85	94,99	1,20	
MP5		0,02	2,45	1,66	27,64	47,50	46,01	96,87	0,12	
MP8		0,03	2,66	1,83	22,66	45,60	41,50	91,00	0,13	
MP9		0,03	2,65	1,77	27,11	49,35	48,16	97,59	0,61	
MP12		0,02	2,63	1,85	22,36	41,73	41,56	99,58	0,35	
MP13		0,04	2,71	1,92	19,06	41,46	36,67	88,43	1,33	
MP14		0,06	2,58	1,71	28,38	50,44	48,74	96,62	1,03	
MP21		0,01	2,56	1,81	22,05	40,84	40,13	98,25	0,14	
MP22		0,02	2,58	1,74	25,52	48,23	44,57	92,41	0,33	
MP23		0,09	2,61	1,81	23,67	44,59	42,89	96,18	0,44	
MP27		0,04	2,63	1,84	22,56	42,52	41,67	98,01	0,44	
Media aritmetica			0,04	2,60	1,79	24,41	45,60	43,52	95,45	0,56
Deviazione standard			0,02	0,07	0,08	3,00	3,57	3,71	3,44	0,44

Tabella 7.3.1 Proprietà fisico-meccaniche delle malte delle Piccole Terme.

7.4 Caratteristiche granulometriche dell'aggregato mediante analisi d'immagine (iPSD)

La caratterizzazione granulometrica è stata realizzata mediante analisi d'immagine su sezione sottile al fine di ottenere un'analisi meno invasiva rispetto al comune attacco acido del legante carbonatico.

Per eseguire l'analisi granulometrica tramite attacco acido, è infatti necessaria una massa di materiale rappresentativo di circa 100 g. Una sezione sottile richiede invece piccoli volumi di malta con masse di circa 20 g che portano al risparmio dell'80% circa di materiale.

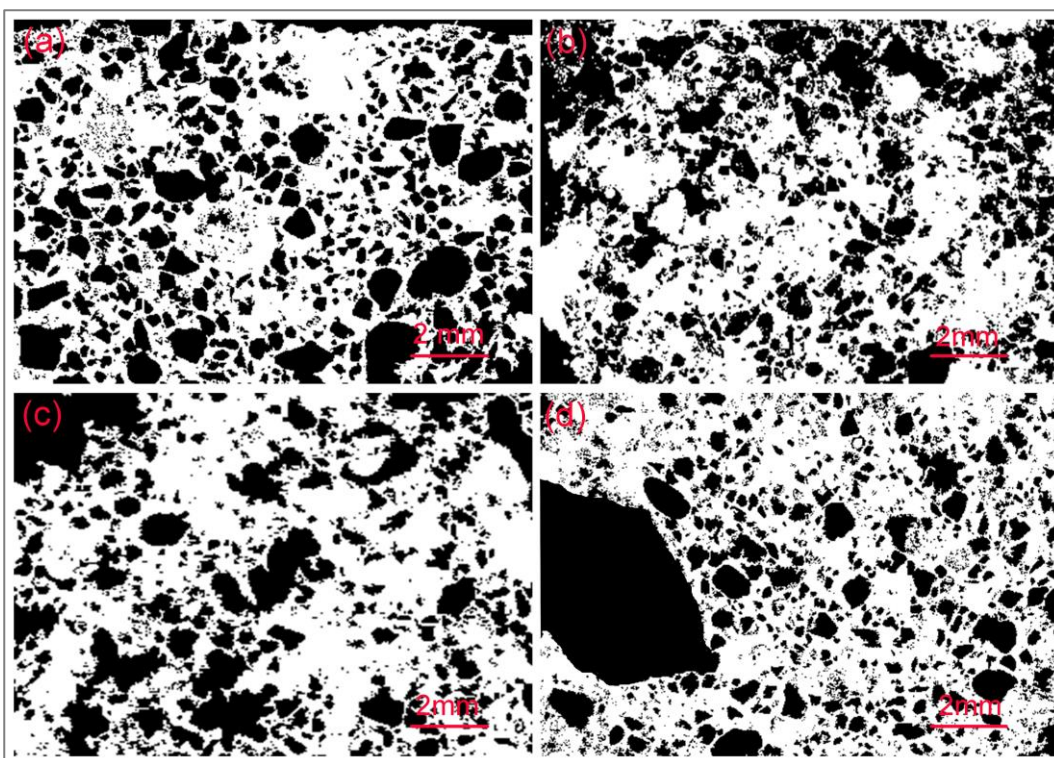


Figura 7.4.1: Binarizzazione parziale d'immagini ricavate dalle sezioni sottili relative a quattro campioni di malte di allettamento.

L'analisi d'immagine in sezione sottile, il cui procedimento è spiegato nel Capitolo 6, ha permesso di ottenere il rapporto Legante/Aggregato (L/A) e le caratteristiche della curva granulometrica di ogni malta campionata.

Un esempio della binarizzazione delle immagini su cui sono stati ottenuti i dati granulometrici è mostrato in Fig. 7.4.1 per quattro campioni di malta di allettamento.

In Tab. 7.4.1 si nota come i rapporti L/A presentano una media di 1,06 con estremi $0,78 < L/A < 1,76$ nelle malte di allettamento dei concii/laterizi.

Nel gruppo dei campioni di arriccio si registra $0,75 < L/A < 2,00$ con una media di 1,36.

Campione	Funzione	L/A	Trattenuto al setaccio virtuale (%)								
			8000µm	4000µm	2000µm	1000µm	500µm	250µm	125µm	63µm	<63µm
MP1	Malte di allettamento dei conci/laterizi	1,25	0,00	0,00	0,00	3,06	14,29	22,45	22,96	27,04	10,20
MP3		0,87	0,00	0,00	0,00	3,66	17,07	33,54	27,44	6,10	12,20
MP10		1,23	0,00	0,72	1,45	5,43	20,65	33,70	14,49	18,48	5,07
MP15		1,76	0,00	0,00	0,00	13,74	25,95	30,53	15,27	8,40	6,11
MP16		0,97	0,60	1,20	3,61	7,83	12,05	31,93	18,07	15,66	9,04
MP17		0,82	0,00	1,13	2,82	5,08	9,04	42,94	16,95	13,56	8,47
MP25		1,06	0,00	0,00	5,26	3,16	11,58	23,16	30,53	18,95	7,37
MP28		1,12	0,35	0,35	1,40	2,81	20,70	40,35	20,70	10,88	2,46
MP29		0,82	0,00	0,36	1,78	2,14	9,61	26,33	29,18	22,06	8,54
MP30		1,08	0,00	0,00	1,59	4,76	12,70	33,33	26,98	7,94	12,70
MP33		0,94	0,00	0,00	1,44	7,76	24,14	26,72	22,13	11,78	6,03
MP35		0,94	0,00	0,31	1,85	8,64	27,47	23,77	17,59	14,81	5,56
MP38		0,99	0,00	0,30	0,30	8,36	30,15	25,97	17,01	14,33	3,58
MP41		1,05	0,00	0,62	1,54	4,94	22,22	41,36	15,12	7,10	7,10
MP43		0,98	0,00	0,49	0,97	6,31	16,50	50,49	13,59	7,28	4,37
MP44	0,78	0,00	0,54	1,63	5,43	24,46	37,50	18,48	8,15	3,80	
MP47	1,41	0,00	1,08	1,08	6,45	34,41	42,47	5,91	5,91	2,69	
MP4	Malte d'intonaco: arriccio	1,56	0,00	0,00	0,74	2,22	29,63	40,74	14,07	8,15	4,44
MP5		1,42	0,00	0,00	0,76	3,79	20,45	28,79	24,24	13,64	8,33
MP8		0,85	0,32	0,32	1,27	4,76	16,51	30,79	21,59	17,46	6,98
MP12		1,41	0,00	0,48	0,73	1,94	9,44	29,06	31,23	21,55	5,57
MP14		0,75	1,08	0,00	11,83	10,75	43,01	7,53	8,60	8,60	8,60
MP21		1,61	0,00	1,14	2,86	5,14	20,57	43,43	10,29	10,29	6,29
MP22		2,00	0,00	0,00	0,00	5,08	18,27	38,58	22,34	11,68	4,06
MP23		1,09	0,00	0,00	1,05	4,19	24,61	39,79	17,80	6,28	6,28
MP27		1,54	0,00	0,00	1,62	3,78	42,70	17,30	15,68	15,14	3,78

Tabella 7.4.1: Rapporto Legante/Aggregato e percentuale di trattenuto al relativo setaccio virtuale.

Di norma, il rapporto L/A utilizzato nelle malte Romane era proporzionale allo spessore della gettata. Secondo quanto raccomandato dall'architetto Romano Vitruvio (Pollione 15 AC), spessori della gettata di 1-2 cm necessitavano una percentuale di aggregato intorno al 65-70%, mentre spessori > 2 cm necessitavano una percentuale di circa 70-80% (Cagnana 2000).

In entrambi i gruppi, gli spessori delle gettate misurati *in situ* si aggirano intorno ai 2 cm ed avrebbero quindi richiesto percentuali simili di aggregato. Risulta, invece, che in media nelle malte di allettamento è presente circa il 49% di aggregato ed il 43% nei campioni di arriccio, ad evidenziare malte più "grasse" di quanto raccomandato da Vitruvio.

L'analisi del trattenuto (sulla base di un calcolo virtuale), mostra per le malte di allettamento dei conci/laterizi una granulometria degli aggregati piuttosto variabile (Tab. 7.4.1).

Nei campioni di malta di allettamento il trattenuto più elevato è, nella maggior parte dei campioni, concentrato nel setaccio virtuale di 250 µm. Nei campioni MP10, 15, 33, 35, 38, 41, 43, 44, 47 si ha, oltre ad un abbondante trattenuto al 250 µm anche una discreta quantità di materiale al setaccio virtuale di 500 µm (Tab. 7.4.1).

Nei campioni MP3, 16, 17, 25, 28, 29, 30 oltre ad un abbondante trattenuto al 250 µm si nota anche

una discreta quantità di materiale al setaccio virtuale di 125 μm (Tab. 7.4.1). Le malte di allettamento quindi sono composte da due sottogruppi; un primo a grana grossolana mentre un secondo a grana più fine. Particolare è il caso del campione MP1 che presenta un aggregato particolarmente fine con trattenuti molto elevati ai setacci virtuali 250, 125 e 63 μm .

Nei campioni di arriccio (Tab. 7.4.1), si nota similmente un forte trattenuto al setaccio virtuale di 250 μm . In alcune malte è presente un abbondante trattenuto al 500 μm (e.g. MP4, 21, 23) ed in altre un abbondante trattenuto al 125 μm (e.g. MP5, 8, 12, 22). I campioni MP14 ed MP27 sono caratterizzati da un trattenuto molto elevato ai setacci di 500, 1000 e 2000 μm .

In Tab. 7.4.2 e 7.4.3 si nota come la curva cumulativa nelle malte di allettamento di conci/laterizi determina granulometrie di tipo prevalentemente uniforme (circa il 57% dei campioni) e in diversi casi di tipo vario.

In alcuni casi il coefficiente di uniformità U è indeterminabile in quanto la curva cumulativa non fornisce il valore del diametro determinante al 10% di passante (D_{10}).

Campione	Funzione	Passante cumulativo al setaccio virtuale (%)								
		8000 μm	4000 μm	2000 μm	1000 μm	500 μm	250 μm	125 μm	63 μm	<63 μm
MP1	Malte di allettamento dei conci/laterizi	100,00	100,00	100,00	96,34	79,27	45,73	18,29	12,20	0,00
MP3		100,00	100,00	100,00	97,53	94,44	86,01	61,73	21,40	0,00
MP10		100,00	99,28	97,83	92,39	71,74	38,04	23,55	5,07	0,00
MP15		100,00	100,00	100,00	86,26	60,31	29,77	14,50	6,11	0,00
MP16		99,40	98,19	94,58	86,75	74,70	42,77	24,70	9,04	0,00
MP17		100,00	98,87	96,05	90,96	81,92	38,98	22,03	8,47	0,00
MP25		100,00	100,00	94,74	91,58	80,00	56,84	26,32	7,37	0,00
MP28		99,65	99,30	97,89	95,09	74,39	34,04	13,33	2,46	0,00
MP29		100,00	99,64	97,86	95,73	86,12	59,79	30,60	8,54	0,00
MP30		100,00	100,00	95,38	90,77	78,46	46,15	20,00	12,31	0,00
MP33		100,00	100,00	98,56	90,80	66,67	39,94	17,82	6,03	0,00
MP35		100,00	99,69	97,84	89,20	61,73	37,96	20,37	5,56	0,00
MP38		100,00	99,70	99,40	91,04	60,90	34,93	17,91	3,58	0,00
MP41		100,00	99,38	97,84	92,90	70,68	29,32	14,20	7,10	0,00
MP43		100,00	99,51	98,54	92,23	75,73	25,24	11,65	4,37	0,00
MP44		100,00	99,46	97,83	92,39	67,93	30,43	11,96	3,80	0,00
MP47		100,00	98,92	97,85	91,40	56,99	14,52	8,60	2,69	0,00
MP4	Malte d'intonaco: arriccio	100,00	100,00	99,25	97,01	91,79	59,70	35,82	13,43	0,00
MP5		100,00	100,00	99,24	95,45	75,00	46,21	21,97	8,33	0,00
MP8		99,68	99,37	98,10	93,33	76,83	46,03	24,44	6,98	0,00
MP12		100,00	99,52	98,79	96,85	87,41	58,35	27,12	5,57	0,00
MP14		98,92	98,92	87,10	76,34	33,33	25,81	17,20	8,60	0,00
MP21		100,00	98,86	96,00	90,86	70,29	26,86	16,57	6,29	0,00
MP22		100,00	100,00	100,00	94,92	76,65	38,07	15,74	4,06	0,00
MP23		100,00	100,00	98,95	94,76	70,16	30,37	12,57	6,28	0,00
MP27		100,00	100,00	98,38	94,59	51,89	34,59	18,92	3,78	0,00

Tabella 7.4.2: Passanti cumulativi al relativo setaccio virtuale.

Nei campioni di arriccio, l'analisi dei diametri determinanti D_{10} - D_{60} , mostrati in Tab. 7.4.3, evidenzia granulometrie di tipo uniforme nel 62% circa dei campioni e varia nei rimanenti 38% circa con coefficienti di uniformità $3,6 < U < 5,71$.

I dati granulometrici appena descritti evidenziano, nelle malte delle Piccole Terme, granulometrie degli aggregati piuttosto fini concentrati prevalentemente nel setaccio di $250 \mu\text{m}$ in entrambi i gruppi. All'interno di uno stesso gruppo sono tuttavia presenti malte a granulometria a volte più grossolana a volte più fine che denotano la produzione d'impasti con caratteristiche differenti probabilmente dovute anche a una diversa manodopera.

Le analisi inoltre dimostrano che la malta è generalmente più "grassa" del dovuto, presentando un aggregato prevalentemente di tipo uniforme, contrariamente a quanto raccomandato da Vitruvio che consigliava l'utilizzo di aggregati a granulometria varia che consentivano il risparmio di legante e presentavano migliori resistenze meccaniche alla compressione.

Campione	Funzione	Diametro determinante al 60% D_{60} (μm)	Diametro determinante al 10% D_{10} (μm)	Coefficiente di uniformità $U = D_{60}/D_{10}$	Tipo di granulometria
MP1	Malte di allattamento dei concii/laterizi	300	n.d.	n.d.	n.d.
MP3		270	n.d.	n.d.	n.d.
MP10		400	80	5	Uniforme
MP15		500	90	5,55	Varia
MP16		360	70	5,14	Varia
MP17		350	70	5	Uniforme
MP25		290	70	4,14	Uniforme
MP28		400	210	1,90	Uniforme
MP29		250	65	3,84	Uniforme
MP30		340	n.d.	n.d.	n.d.
MP33		410	80	5,12	Varia
MP35		490	80	6,12	Varia
MP38		500	90	5,55	Varia
MP41		400	90	4,44	Uniforme
MP43		400	120	3,33	Uniforme
MP44		400	85	4,70	Uniforme
MP47		500	90	5,55	Varia
MP4	Malte d'intonaco: arriccio	250	n.d.	n.d.	n.d.
MP5		340	70	4,85	Uniforme
MP8		340	70	4,85	Uniforme
MP12		270	75	3,6	Uniforme
MP14		400	70	5,71	Varia
MP21		410	80	5,12	Varia
MP22		370	95	3,89	Uniforme
MP23		410	110	3,72	Uniforme
MP27		500	90	5,55	Varia

Tabella 7.4.3: Diametri determinanti D_{10} - D_{60} e coefficienti d'uniformità U dell'aggregato analizzato, n.d.= non determinabile in quanto la curva granulometrica non fornisce il valore di D_{10} .

7.5 Diffrazione a Raggi X (XPRD) sulle malte

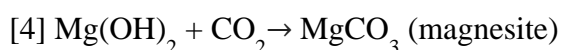
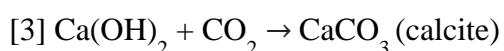
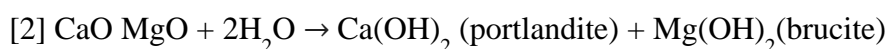
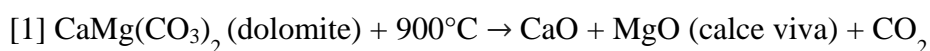
I risultati della diffrazione a Raggi X di alcune malte campionate sull'edificio termale sono riportati in Tab. 7.5.1.

Nelle malte di allettamento dei conci/laterizi (Tab 7.5.1, Fig. 7.5.1a, b, c, d) è registrata una presenza abbondante di calcite, fase minerale di cui è costituito il legante.

Interessante è il caso del campione MP10 in cui è stata rilevata anche la calcite magnesiacca (Ca, Mg (CO₃), Fig. 7.5.1b). È probabile che la fase possa provenire dai gusci scheletrici di bioclasti quali ad esempio gli echinidi (Katarzyna 2018), rilevati nel nostro caso, anche in sezione sottile. In aggiunta si ha la possibilità che la calcite magnesiacca fosse presente nel calcare di produzione del legante.

Come si evidenziava nel Paragrafo 7.1, risulta difficile nel caso delle Piccole Terme di Nora, risalire alle cave di estrazione del calcare per la produzione di legante dal momento che in sezione sottile non si rileva la presenza di “fantasmi” ovvero frammenti di materia prima calcarea che presentano le caratteristiche tessiturali e micro-strutturali della roccia primaria.

In ogni caso, l'uso di calcari a componente dolomitica o calcitico-magnesiacca è già documentato in epoca Romana (Silva et al. 2006). La preparazione delle relative calci avveniva secondo le seguenti reazioni chimiche:



Durante la cottura del calcare, a temperatura pari a circa 900°C [1] si ottengono ossido di calcio e ossido di magnesio (CaO e MgO), entrambi caustici, anche se il magnesio è meno aggressivo perché più lento è il suo processo d'idratazione rispetto a quello del calcio (Cagnana 2001).

Il processo di spegnimento dei due ossidi avveniva secondo la [2] ottenendo idrossidi calcici e magnesiaci poi carbonatati in calcite e magnesite con le [3, 4].

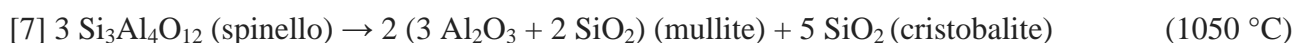
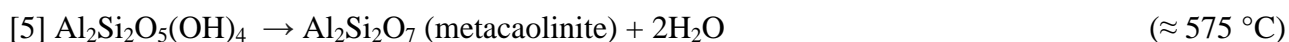
Nelle malte di allettamento risultano da presenti a molto abbondanti quarzo, plagioclasio, K-feldspato e biotite che costituiscono l'aggregato in cristallo-clasti sialici e mafici utilizzato come inerte e già rilevato anche in sezione sottile (Tab. 7.1.1).

Nel campione MP16 (Fig. 7.5.1c), è rilevata la presenza di alite (NaCl), tipica dello spray marino, molto abbondante nella penisola, derivante da sospensione atmosferica in carico con venti

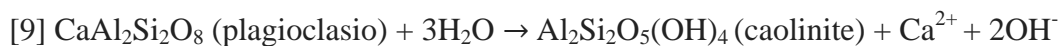
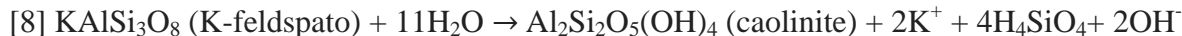
provenienti dai quadranti meridionali (e.g., Scirocco, Ostro e Libeccio).

Nelle malte di allettamento di conci/laterizi è rilevata la presenza di caolinite. Questa fase potrebbe avere differenti origini. Una prima possibilità è che la caolinite derivi dal *Cocciopesto* non sottoposto ad adeguata cottura.

Durante la produzione del laterizio, spesso la materia prima argillosa non veniva adeguatamente cotta in fornace ovvero non veniva raggiunta la temperatura di circa 575 °C alla quale la caolinite si convertiva a fasi minerali di più alta temperatura come ad esempio la metacaolinite [5], lo spinello [6] o la mullite [7], prodotte secondo le seguenti reazioni (Bellotto et al. 1995, Nieuwenburg 1929):



Altre possibili fonti di caolinite potrebbero essere in piccola parte dovute all'alterazione di plagioclasti e K-feldspati secondo la [8] e [9], processo già osservato in sezione sottile sui cristallo-clasti di aggregato.



Più rara è la possibilità che la caolinite possa derivare da un'aggiunta minerale intenzionale. Secondo Mannoni et al. (2004), la tecnica di caolinizzazione della malta (malta porcellanata) inizia ad essere utilizzata in Italia verso il tardo medioevo (XV cent. DC) nelle scuole Genovesi. Sempre secondo lo stesso autore, durante il medioevo, la tecnica sarebbe stata ereditata da Bizantini e Fenici. Questi occuparono l'area archeologica di Nora già dall'VIII sec. AC.

Sebbene la caolinizzazione delle malte di Nora possa essere un'ipotesi plausibile, non si hanno fonti scritte che attestino l'uso della malta porcellanata prima del 400 DC in Europa (Mannoni et al. 2004).

Per quanto riguarda la presenza di minerali di alterazione, si rileva gesso sino a 8% in peso nel campione MP15, con tutta probabilità prodotto di solfatazione della portlandite ad opera dell'anione solfato presente in abbondanza in un ambiente marino come quello di Nora.

Negli intonaci arricci (Tab. 7.5.1, Fig. 7.5.1e, f, g, h), è stata rilevata la presenza di fasi minerali simili a quelle identificate del gruppo delle malte di allettamento di conci/laterizi.

Anche in questo caso si nota un'abbondanza di quarzo, plagioclasio, K-feldspato e biotite che costituiscono l'aggregato sabbioso utilizzato come inerte e rilevato anche in sezione sottile.

Campione	Funzione	Cc	Qz	Pl	Kf	Bio	Gy	Od	Ed	Ka	Al	CM
MP1		••	•••	•	••	•	Tr	-	-	-	-	-
MP2		••	•••	•	••	•	Tr	-	-	-	-	-
MP3		•••	••	•	••	•	Tr	-	-	-	-	-
MP6		•••	••	••	••	•	Tr	-	-	-	-	-
MP10	Malte di allettamento dei conci/laterizi	•	•	••	••	-	Tr	-	-	•	-	••
MP15		•••	••	••	••	•	•	-	-	-	-	-
MP16		•••	••	•	••	•	Tr	-	-	-	Tr	-
MP17		•••	••	••	••	•	-	-	-	•	-	-
MP25		•••	••	••	••	•	-	-	-	•	-	-
MP28		•••	••	•	•	Tr	Tr	-	-	•	-	-
MP29		•••	••	••	•	•	Tr	-	-	-	-	-
MP4		•••	••	••	•	Tr	•	-	-	-	-	-
MP5		•••	••	••	••	•	•	-	-	-	-	-
MP8		•••	••	••	••	•	Tr	Tr	-	-	-	-
MP9		•••	••	••	••	•	Tr	Tr	•	-	-	-
MP12		•••	••	••	•	•	-	-	-	•	-	-
MP13	Malte d'intonaco: arriccio	•••	••	•	•	•	-	-	-	•	-	-
MP14		•••	••	•	•	•	-	-	-	-	Tr	-
MP21		•••	••	•	••	•	•	-	-	-	-	-
MP22		•••	••	•	•	-	••	-	-	-	-	-
MP23		•••	••	••	•	Tr	•	-	-	•	-	-
MP27		•••	••	•	•	Tr	•	-	Tr	-	Tr	-

Tabella 7.5.1: Analisi mineralogica semi-quantitativa delle malte (XPRD): •••= Molto abbondante; •• = Abbondante; • = Presente; Tr = presente in tracce; - = Non rilevato.

Cc = calcite, Qz = quarzo, Pl = plagioclasio, Kf = K-feldspato, Bio = biotite, Gy = gesso, Od = oldhamite, Ed = hedenbergite, Ka = caolinite, Al = alite, CM = calcite magnesiacca.

In MP9 ed MP27 la presenza del pirosseno hedenbergite (Fig. 7.5.1f), potrebbe derivare da piccoli frammenti di litoclasti di dacite, andesite e riocite anch'essi già rilevati in sezione sottile.

Tracce di alite (NaCl) provenienti dallo spray marino della zona sono state rilevate in MP14 ed MP27. Il cloruro di sodio è un sale fortemente dannoso nelle strutture murarie poiché essendo altamente igroscopico, contribuisce in maniera notevole alla pressione di cristallizzazione salina in materiali peraltro altamente porosi come le malte. Ricordiamo, a tal proposito, che le porosità efficaci di malte di allettamento di conci/laterizi ed intonaci arricci (Paragrafo 7.3), risultano pari a 43 e 45,6% rispettivamente. L'alite presente nell'aerosol marino può depositarsi a distanze sino a 25 Km dal litorale in base alla velocità del vento e al grado di concentrazione della stessa fase nell'atmosfera in prossimità della costa (Vignati 2000).

Solfuro di calcio (oldhamite) è presente come fase in tracce nei campioni MP8 ed MP9 (Fig. 7.5.1e, f). Secondo Poole & Sims (2016) l'oldhamite è un prodotto "minore" derivante da scorie formati nei forni di cottura del calcare per la produzione delle malte.

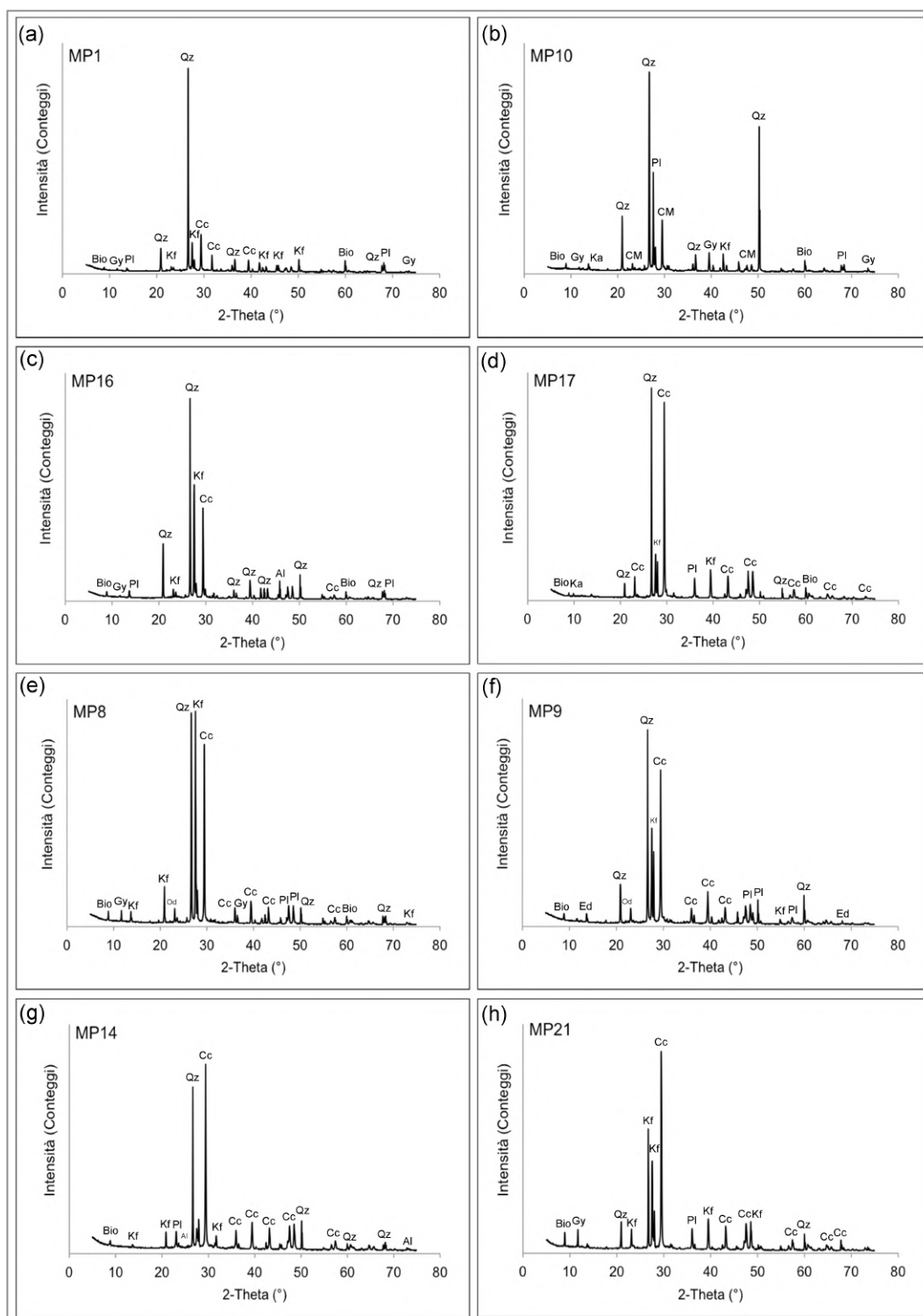


Figura 7.5.1: Esempi di diffrazioni sulle malte (XPRD) eseguiti su 4 malte di allettamento di concii/laterizi (MP1, MP10, MP16, MP17) e su 4 arricci (MP8, MP9, MP14, MP21).
 Cc = calcite, Qz = quarzo, Pl = plagioclasio, Kf = K-feldspato, Bio = biotite, Gy = gesso, Ka = caolinite, Od = oldhamite, Ed = hedenbergite, Al = alite, CM = calcite magnesiaca.

L'oldhamite è spesso rinvenuta in associazione con la calcite ed il gesso, fasi anch'esse presenti nei due campioni (Tab. 7.5.1).

Nelle malte non sono state identificate fasi idrauliche di neoformazione dovute alle reazioni del

carbonato di calcio con i silicati presenti negli aggregati. Ciò è dovuto principalmente al fatto che il processo di reazione pozzolanica di norma produce fasi fortemente amorfe (gel) non individuabili in diffrazione ai Raggi X.

7.6 Analisi termo-gravimetrica (TGA) sulla frazione legante

Le curve di decomposizione termica ottenute in analisi TGA sui leganti delle malte delle Piccole Terme, presentano alcune perdite in peso caratteristiche.

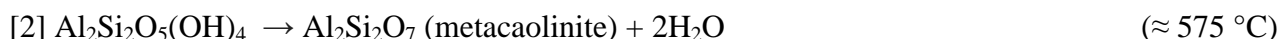
La curva di decomposizione termica (Fig. 7.6.1a, b), è caratterizzata da una prima transizione a circa 40-50 °C legata all'evaporazione dell'acqua di umidità, registrata in tutte le malte in maniera più o meno marcata. Nelle malte di allettamento dei conci/laterizi, tale perdita in peso è ben visibile nei campioni MP1, MP7 ed MP28 (Fig. 7.6.1a) mentre negli intonaci arricci è evidente in MP4, MP5 e MP27 (Fig. 7.6.1b).

Nell'intervallo compreso fra 90-130 °C è possibile identificare una perdita in peso caratteristica dovuta probabilmente alla trasformazione del gesso in anidrite secondo la [1]:



Il picco relativo a questa transizione è presente nei campioni di entrambi i gruppi di malta, tuttavia appare più marcato negli intonaci arricci dove la diffrazione identificava un quantitativo di gesso da presente ad abbondante (Tab. 7.5.1). Nelle malte di allettamento di conci/laterizi, il gesso era invece rilevato in quantità minori.

Nelle curve di decomposizione termica di Fig. 7.6.1a, b non si rilevano particolari transizioni chimiche fino a 550-650 °C dove in alcuni campioni, una debole rottura di pendenza della curva visibile soprattutto in MP10, MP25 ed MP28, potrebbe essere imputabile al processo di disidratazione della caolinite con formazione di metacaolinite secondo la [2].



Il processo di decarbonatazione del legante avviene in un intervallo 520-800 °C come visibile in Fig. 7.6.1a, b. Secondo Bakolas et al. (1998, 1995) e Moropoulou et al. (2000), la perdita in peso relativa all'acqua di una malta in termo-gravimetria ($\Delta\text{H}_2\text{O}\%$) è stimata in un intervallo di temperatura 200-520 °C mentre perdita in peso relativa all'anidride carbonica ($\Delta\text{CO}_2\%$) è stimata in un intervallo 520-850 °C. Tali perdite in peso, relative a 11 campioni di malte di allettamento e 11 campioni di arriccio, sono state raccolte in Tab. 7.6.1 e illustrate graficamente in Fig. 7.6.1c, d.

Nelle malte di allettamento, la perdita in peso relativa all'anidride carbonica è compresa in un intervallo $7,08 < \Delta\text{CO}_2 < 25,99\%$ con media di $13,43 \pm 7,38\%$.

Negli arricci i valori sono più elevati e compresi in un intervallo $12,85 < \Delta\text{CO}_2 < 23,17\%$ con media di $16,31 \pm 3,67\%$.

I rapporti medi $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{H}_2\text{O}$ sono pari a $10,43 \pm 4,90\%$ nelle malte di allettamento e $12,80 \pm 6,28\%$ negli intonaci arricci (Tab. 7.6.1).

Campione	Funzione	Peso perso per range di temperatura (%)		$\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{H}_2\text{O}$
		200-520 °C ($\Delta\text{H}_2\text{O}$)	520-800 °C (ΔCO_2)	
MP1	Malte di allettamento dei conci/laterizi	2,39	8,05	3,37
MP2		1,08	7,94	7,35
MP3		1,30	11,98	9,20
MP6		0,97	8,49	8,73
MP7		1,83	12,94	7,07
MP10		0,81	7,08	8,75
MP15		0,97	21,58	22,34
MP16		1,00	10,39	10,39
MP17		1,83	25,69	14,04
MP25		0,73	7,56	10,32
MP28		1,97	25,99	13,21
Media aritmetica			1,35	13,43
Deviazione standard		0,56	7,38	4,90
MP4	Malte d'intonaco: arriccio	1,63	23,17	14,18
MP5		2,68	13,76	5,13
MP8		0,95	15,56	16,29
MP9		1,23	13,83	11,22
MP12		1,15	19,75	17,11
MP13		0,97	13,46	13,90
MP14		2,67	17,60	6,58
MP21		0,83	21,61	26,10
MP22		3,89	14,66	3,77
MP23		0,91	12,85	14,05
MP27		1,05	13,11	12,47
Media aritmetica			1,63	16,31
Deviazione standard		1,00	3,67	6,28

Tabella 7.6.1: Analisi termo-gravimetriche sui leganti delle malte: percentuale di peso perso in intervalli di temperatura 200-520 °C ($\Delta\text{H}_2\text{O}$) e 520-800 °C (ΔCO_2).

Da Fig. 7.6.1c, si nota come sia possibile suddividere i campioni in tre ellissi a', b', c' ottenendo dei gruppi in funzione d'idraulicità decrescente.

Nel primo ellisse (a') sono presenti 6 campioni di malte di allettamento dei conci/laterizi (MP1, 2, 6, 10, 16, 25), caratterizzati da una idraulicità relativamente elevata con $7,08 < \Delta\text{CO}_2 < 10,39\%$.

Nel secondo ellisse (b') si trovano 9 campioni di arriccio (MP5, 8, 9, 12, 13, 14, 22, 23, 27) e 2 campioni di malta di allettamento (MP3, 7). L'idraulicità del gruppo rientra nel range $11,98 < \Delta\text{CO}_2 < 19,75\%$.

Nel terzo ellisse (c') sono presenti campioni con idraulicità relativamente basse ($21,58 < \Delta\text{CO}_2 < 25,99$) in cui rientrano un totale di 5 campioni suddivisi in 2 arricci (MP4, 21) e 3 malte di allettamento di conci/laterizi (MP15, 17, 28).

In Fig. 7.6.1d si nota come l'insieme di tutte le malte, plottate nel diagramma ΔCO_2 vs

$\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{H}_2\text{O}$, presentano una debole correlazione polinomiale con coefficiente $R^2 = 0,35$.

Tra i due gruppi di malta, l'idraulicità è maggiore nelle malte di allettamento di conci/laterizi ($\Delta\text{CO}_2 = 13,43 \pm 7,38\%$) rispetto agli arricci ($\Delta\text{CO}_2 = 16,31 \pm 3,67\%$).

Normalmente differenze d'idraulicità fra leganti sono da attribuire in primis ad una diversa pozzolanicità della materia prima calcarea utilizzata nella produzione (Moropoulou 1995, 2000). Differenze d'idraulicità possono inoltre derivare da una diversa tipologia e/o quantità di aggregato pozzolanico utilizzata (Moropoulou 1995).

È necessario a questo proposito dichiarare che la separazione manuale legante/aggregato non è efficiente al 100% per cui è possibile che i valori d'idraulicità siano alterati dalla presenza di piccoli frammenti di aggregato o da grumi di calce.

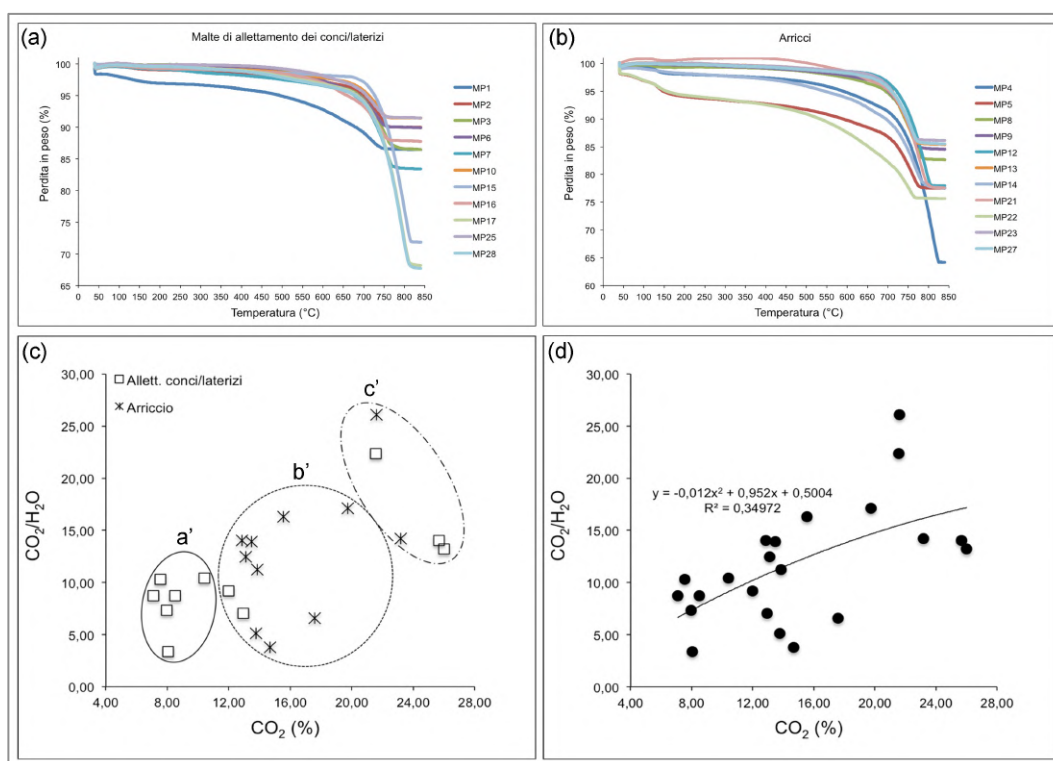


Figura 7.6.1: Analisi termo-gravimetriche sui leganti delle malte: (a) curve di decomposizione termica delle malte di allettamento dei conci/laterizi, (b) curve di decomposizione termica degli arricci, (c) diagramma CO_2 vs $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ per malte di allettamento dei conci/laterizi ed intonaci arricci, (d) diagramma CO_2 vs $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ per malte di allettamento dei conci/laterizi ed arricci riuniti in una sola serie.

Nel nostro caso è probabile che la produzione di malte di allettamento ed intonaci arricci, realizzate in due fasi costruttive differenti, sia avvenuta con l'uso di due materie prime calcaree a pozzolanicità differente. In particolare il calcare utilizzato per la produzione delle malte di allettamento potrebbe aver avuto un contenuto d'impurità argillose più elevato rispetto a quello utilizzato nella produzione degli arricci fornendo quindi una maggiore pozzolanicità.

Nell'ellisse c'è invece, i valori di idraulicità dei 5 campioni in analisi potrebbero essere falsati dalla presenza di grumi di calce. L'eventuale uso di due materie prime calcaree a pozzolanicità differente avvalorava l'ipotesi di un trasporto di calcari per la produzione di malte dalla vicina città di *Karalis* come già osservato nel Paragrafo 7.1. A *Karalis*, lo sfruttamento di materia prima calcarea appartenente a *facies* con diverso tenore argilloso (pietra Cantone, tramezzario e pietra Forte), è già stata documentata in epoca Romana (Coroneo 1993, vedi Capitolo 8).

La Basilica di San Saturnino: risultati e discussioni

8.1 Caratteristiche petrografiche (OM)

La Basilica di San Saturnino è stata edificata principalmente con roccia calcarea locale (pietra Cantone e pietra Forte) appartenenti alla serie carbonatica Miocenica di Cagliari. Come già si specificava nel Capitolo 2, nell'abside dell'edificio, l'uso di una pietra vulcanica di colore scuro (andesite) alternata ai conci calcarei di colorazione chiara, costituisce l'Opera Bicroma o Bicromia. Nella Basilica si registra inoltre l'utilizzo di marmo per la realizzazione di colonnati interni ed esterni.

8.1.1 Pietra Cantone e pietra Forte

La pietra Cantone è il litotipo più utilizzato nella costruzione della Basilica.

Questa roccia è generalmente caratterizzata da una colorazione tendente al giallo chiaro, (spazio colore CIELAB 88*3*36), ed è sovente alternata a *facies* leggermente più scure di tonalità di giallo CIELAB 65*3*28 (Fig. 8.1.1.1a). In sezione sottile, presenta le caratteristiche di un calcare marnoso fango-sostenuto con scarsa o assente stratificazione (Fig. 8.1.1.2a, b).

L'80% vol. della roccia consiste in una matrice di tipo carbonatico microcristallino con 5-15% vol. di componente argillosa (e.g., illite e caolinite). Circa il 3% vol. consiste in bioclasti ed il restante 2% vol. circa consiste in terrigeni granulari (allochimici) riconducibili a cristalli sialici (e.g. quarzo, plagioclasio, K-feldspato) e mafici (e.g. biotite).

La roccia è stata interessata da eventi diagenetici di deformazione fragile con la formazione di fratture secondarie che hanno sviluppato una debole porosità secondaria visibile in sezione sottile (Cherchi 1974).

La componente bioclastica (Fig. 8.1.1.2b), è costituita da foraminiferi planctonici e bentonici (circa 30%) mentre il restante 70% da crinoidi allungati, brachiopodi, briozoi e lamellibranchi.

La presenza di foraminiferi è tipica di acqua ossigenata e limpida con salinità normale indicante un ambiente di deposizione di profondità circa 60-80 m, riferibile al piano circalitorale, caratterizzato da scarsa luminosità (Cherchi 1974). Secondo la classificazione delle rocce carbonatiche adottata da Folk (1959) la pietra Cantone, in base al contenuto volumetrico di matrice $> 2/3$ e dei suoi allochimici, può essere classificata come biomicrite.

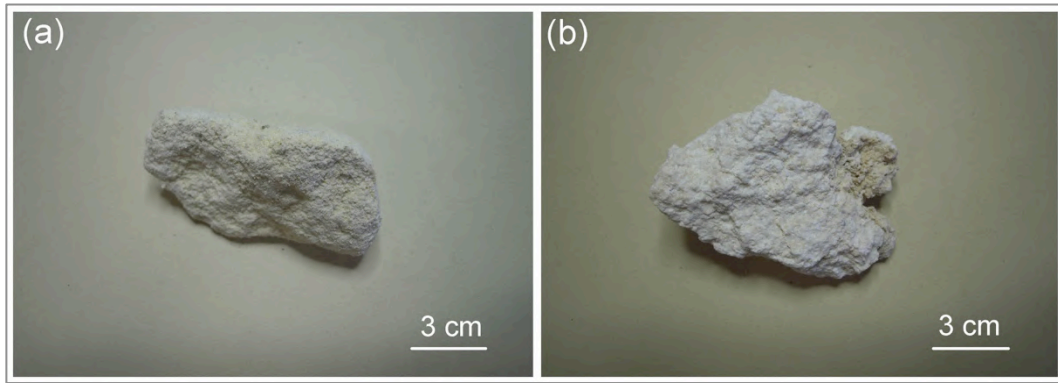


Figura 8.1.1.1: Caratteristiche macroscopiche dei calcari di San Saturnino: (a) frammento di pietra Cantone, (b) frammento di pietra Forte.

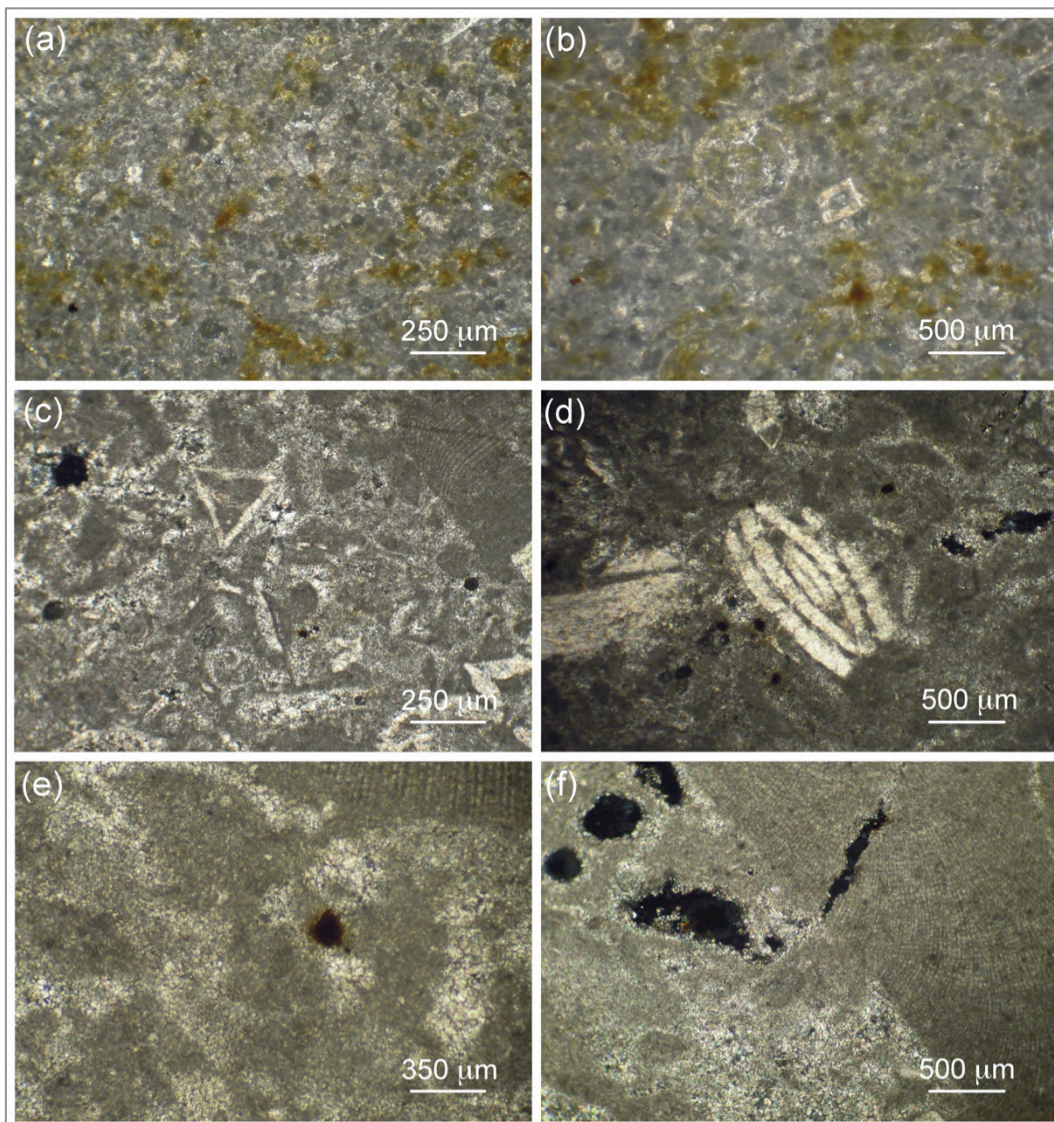


Figura 8.1.1.2: Caratteristiche microscopiche dei calcari di San Saturnino: (a) tessitura fango-sostenuta in un campione di pietra Cantone, (b) fauna bioclastica su pietra Cantone, (c) cemento carbonatico negli interstizi fra bioclasti (pietra Forte), (d) bioclasti su pietra Forte, (e) raro nodulo di materiale argilloso su pietra Forte, (f) cemento carbonatico all'interfaccia con un bioclasto. Da Columbu et al. 2018c.

La pietra Forte mostra in generale una colorazione tendente al bianco (spazio colore: CIELAB 98*³-1), e più raramente al beige secondo CIELAB 48*⁰*17 (Fig. 8.1.1.1b).

In sezione sottile la pietra Forte presenta tutte le caratteristiche di un calcare massivo.

Il litotipo è caratterizzato da una scarsa stratificazione con componente fossilifera pari al 90% vol. e l'8% vol. di cemento carbonatico microcristallino con tenore in CaCO₃ medio del 90% (Cuccuru et al. 2014). Come visibile in Fig. 8.1.1.2c tale cemento è ben riconoscibile come riempimento negli spazi vuoti tra bioclasti. Nella pietra Forte, la componente argillosa (Fig. 8.1.1.2e) varia da 0 a 2% vol.

Il contenuto fossilifero è vario (Fig. 8.1.1.2c, d, f), costituito principalmente da frammenti di crinoidi allungati, brachiopodi, briozoi, foraminiferi, alghe (litotammi) e frammenti conchigliari non identificabili.

L'ambiente deposizionale della pietra Forte è litorale e infralitorale, con elevata energia e paleo-batimetria inferiore a 30 m (Barca et al. 2009). La presenza di superfici di discordanza e brecce miste in affioramento, testimonia l'instabilità del bacino di sedimentazione.

L'età non è precisabile su dati micropaleontologici ma, sulla base della posizione stratigrafica e sulla base delle faune osservate, è riferibile al Tortoniano (Barca et al. 2009).

Secondo la classificazione delle rocce carbonatiche adottata da Folk (1959) la pietra Forte, può essere classificata come biolitite.

8.1.2 Vulcaniti

Macroscopicamente, le vulcaniti mostrano almeno due *facies* cromatiche.

Di solito si rileva una *facies* rosso-marrone, (CIELAB 37*1*5) ed una *facies* violacea (CIELAB 17*25*19, Fig. 8.1.2.1a, b).

In sezione sottile la roccia presenta struttura porfirica (I.P. = 38-40%) per fenocristalli di plagioclasio, pirosseno, opachi, olivina e rari anfiboli. La pasta di fondo è ipoialina inequigranulare, principalmente isotropa e localmente anisotropa.

Gli opachi sono in prevalenza rappresentati da magnetite sempre di dimensione sub-millimetrica con abbondanze nell'ordine del 4% su totale dei fenocristalli. I plagioclasti (circa 80%) sono caratterizzati da abiti subedrali ed euedrali con dimensioni da 0,1 mm a 1,5 mm.

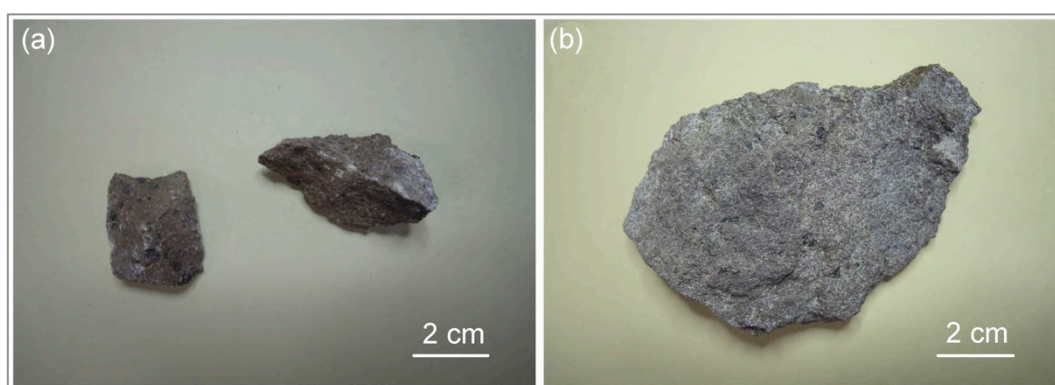


Figura 8.1.2.1: Caratteristiche macroscopiche delle vulcaniti di San Saturnino.

Il contenuto di anortite nel plagioclasio è rilevato in un intervallo del 40-50% (andesina).

I plagioclasti, presentano zonazioni evidenti e sono spesso caratterizzati dalla presenza di nuclei corrosi e parzialmente riassorbiti circondati da bordi zonali oscillatori. Si rinvengono spesso cristalli relitti (Fig. 8.1.2.2g).

I pirosseni (circa 6%, Fig. 8.1.2.2h), sono principalmente di tipo monoclini (dimensioni da 1 a 4,5 mm) con abito subedrale, mentre solo occasionalmente si rilevano pirosseni di tipo ortorombico.

I fenocristalli di clinopirosseno, ortopirosseno, plagioclasio e opachi, formano spesso glomeruli di cristalli, conferendo appunto una struttura glomerulare-porfirica.

Tra i fenocristalli sono frequenti i relitti di olivina (circa 8%), fortemente corrosi e alterati in iddingsite.

Circa il 2% dei fenocristalli è rappresentato da orneblenda bruna spesso anedrale con dimensioni sempre inferiori al millimetro.

La pasta di fondo è costituita essenzialmente da plagioclasio, pirosseno, opachi e vetro.

Questo ha un colore tipicamente marrone o violaceo ed influenza la colorazione macroscopica della roccia di cui si parlava in precedenza. Sulla base del contenuto di minerali sialici (QAPF, Streckeisen 1974) e sulla base del contenuto medio di anortite nei plagioclasti, queste rocce sono classificate come andesiti.

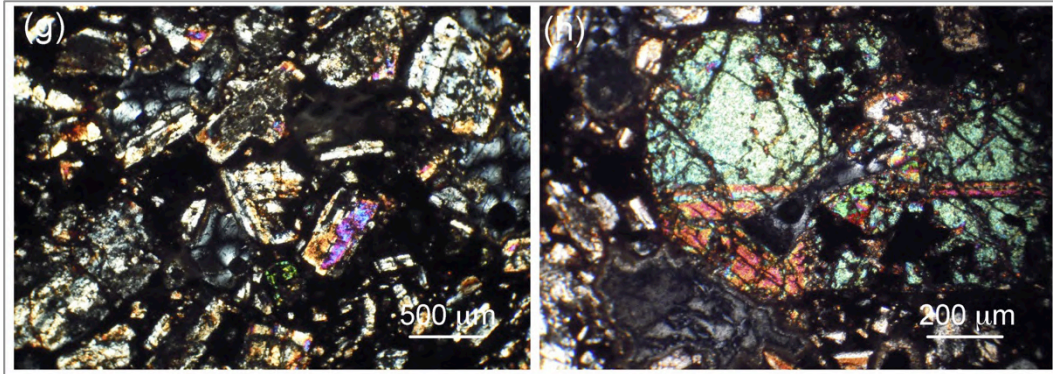


Figura 8.1.2.2: Caratteristiche microscopiche delle vulcaniti di San Saturnino: (g) cristalli riassorbiti e relitti di plagioclasio, (h) fenocristallo di pirosseno monoclinico. Da Columbu et al. 2018c.

Com'è possibile osservare nel Capitolo 3, nell'area di Cagliari non sono presenti in affioramento vulcaniti riconducibili a quelle appena descritte.

Osservazioni OM e confronti macroscopici tra l'andesite del monumento e le vulcaniti provenienti dai centri di emissione vulcanici Oligo-Miocenici dell'area di Pula-Sarroch farebbero emergere delle analogie legate a tessitura, struttura e colorazione.

Non è da escludere che i conchi di andesite usati a San Saturnino potrebbero rappresentare materiale di riutilizzo proveniente dal sito archeologico di Nora (Columbu et al. 2018c).

8.1.3 Marmi

I marmi bianchi (Fig. 8.1.3.1a, b), a differenza dei colorati (Fig. 8.1.3.1c, d), di solito presentano delle notevoli difficoltà di classificazione alla sola osservazione macroscopica.

Marmi bianchi di provenienza Greca, Italiana, Turca o Portoghese presentano caratteristiche molto simili che rendono difficoltosa una distinzione alla sola osservazione macroscopica. Nei marmi colorati invece la roccia può essere facilmente distinta spesso solo con osservazione macroscopica.

Nei marmi bianchi, per poter identificare un'area geografica di provenienza è necessario uno studio in sezione sottile ed una analisi isotopica. In questo paragrafo i marmi bianchi sono momentaneamente discriminati mediante osservazioni OM mentre l'analisi isotopica sarà descritta nel Paragrafo 8.7.

Le caratteristiche microscopiche dei marmi bianchi campionati nella Basilica di San Saturnino, sono riportate in Tab. 8.1.3.1.

In sezione sottile un parametro discriminante nell'identificazione del marmo è il Maximum Grain Size (MGS), ovvero la grandezza media in mm dei cristalli di calcite o dolomite. In osservazioni in sezione sottile, si nota un MGS = 2,55 e 2,75 mm nei campioni SS34 ed SS35 mentre nei rimanenti campioni MGS è spesso inferiore al millimetro (Tab. 8.1.3.1). Sulla base della granulometria iniziamo quindi ad identificare due gruppi, marmi a grana grossolana (SS34, 35) e fine (SS16, 17, 20, 51, 70a, 112).

Campione	Qtz	Ms	Gr	Ossidi di Ferro e altri ossidi metallici	Pl	Ap	Dol	MGS (mm)	Bordo dei cristalli calcitici	Tessitura	Fabric
SS16	±	±	±					0,42	Rettilineo, curvato	HO	Mosaico con alcuni punti tripli
SS17			±	±				0,80	Curvato ± rettilineo	HO/HE	Mosaico
SS20	±	+	±	+(He, Py)	±			0,45	Rettilineo, curvato	HO	Mosaico con alcuni punti tripli
SS34	+	+ /+++	±	++ (Py)				2,55	Suturato	HE	Mosaico con cristalli allungati
SS35		±	++			±		2,75	Curvato	HE	Mosaico
SS51	+++		±	± (Py)				1,05	Curvato ± rettilineo	HO/HE	Mosaico leggermente foliato
SS70a	+	±		+(He, Py)				0,70	Curvato, convesso	HE	Mosaico con frammenti fini
SS112	+	±	±	+(He, Py, Mag)	++		±	0,65	Rettilineo ± curvato	HO	Poligonale (con punti tripli)

Tabella 8.1.3.1: Caratteristiche petrografiche dei marmi bianchi di San Saturnino: Qtz = quarzo, Ms = muscovite, Gr = granato, He = ematite, Py = Pirite, Mag = magnetite, Pl = plagioclasio, Ap = apatite, Dol = dolomite. MGS = Maximum Grain Size dei cristalli di CaCO₃ o Ca,Mg(CO₃)₂, HO = oloblastica, HE = eteroblastica. Da Columbu et al. 2018c.

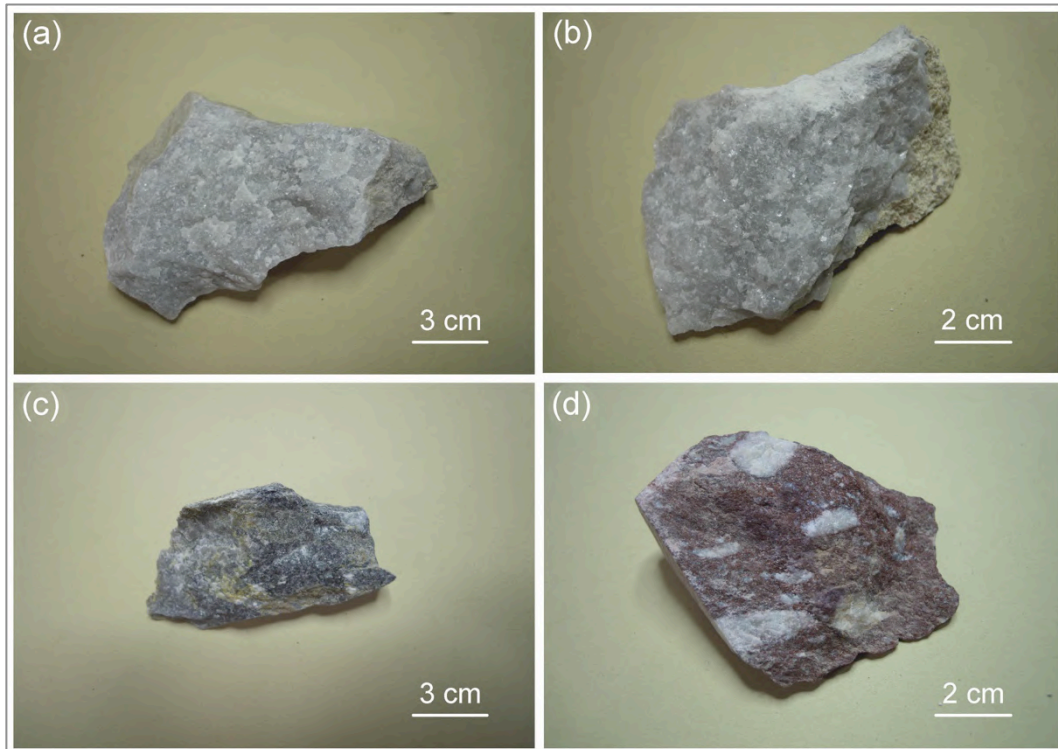


Figura 8.1.3.1: Caratteristiche macroscopiche dei marmi di San Saturnino: (a) marmo bianco SS51, (b) marmo bianco SS34, (c) marmo bigio colorato SS63, (d) marmo Rosso Antico (SS11).

I marmi a grana grossolana (Fig. 8.1.3.2b, c), mostrano bordi dei cristalli calcitici di tipo suturato in SS34 e curvato in SS35 con tessiture in entrambi i casi eteroblastiche.

Nei marmi a grana fine (Fig. 8.1.3.2a), i bordi dei cristalli calcitici sono di tipo curvato misto a rettilineo ed in un solo caso curvati convessi, dove con il termine convesso si indicano bordi riassorbiti o corrosi.

Le tessiture rilevate in questo ultimo gruppo sono di tipo oloblastico (HO) ed eteroblastico (HE) mentre alcuni marmi come SS17 ed SS51 presentano tessitura mista HO, HE.

In tutti i campioni analizzati il *fabric* è di tipo mosaicato distinto in punti tripli, foliato, e a cristalli allungati. Il campione SS112 mostra invece un *fabric* poligonale con punti tripli (Tab. 8.1.3.1).

I minerali accessori nei marmi bianchi sono risultati rari o assenti con plagioclasti sul campione SS20, apatite sul campione SS35 e dolomite, plagioclastio sul campione SS112 (Columbu et al. 2018c).

Oltre alla calcite sono stati rilevati ossidi metallici in tutti i campioni ad esclusione di SS35.

Il granato è presente nella maggioranza dei marmi ad esclusione di SS16 e SS70a. La muscovite è presente in tutti i marmi, piuttosto abbondante in SS34, è invece assente in SS17 ed SS51. Il quarzo è frequente in ogni campione, abbondante in SS51 e assente in SS35 ed SS17.

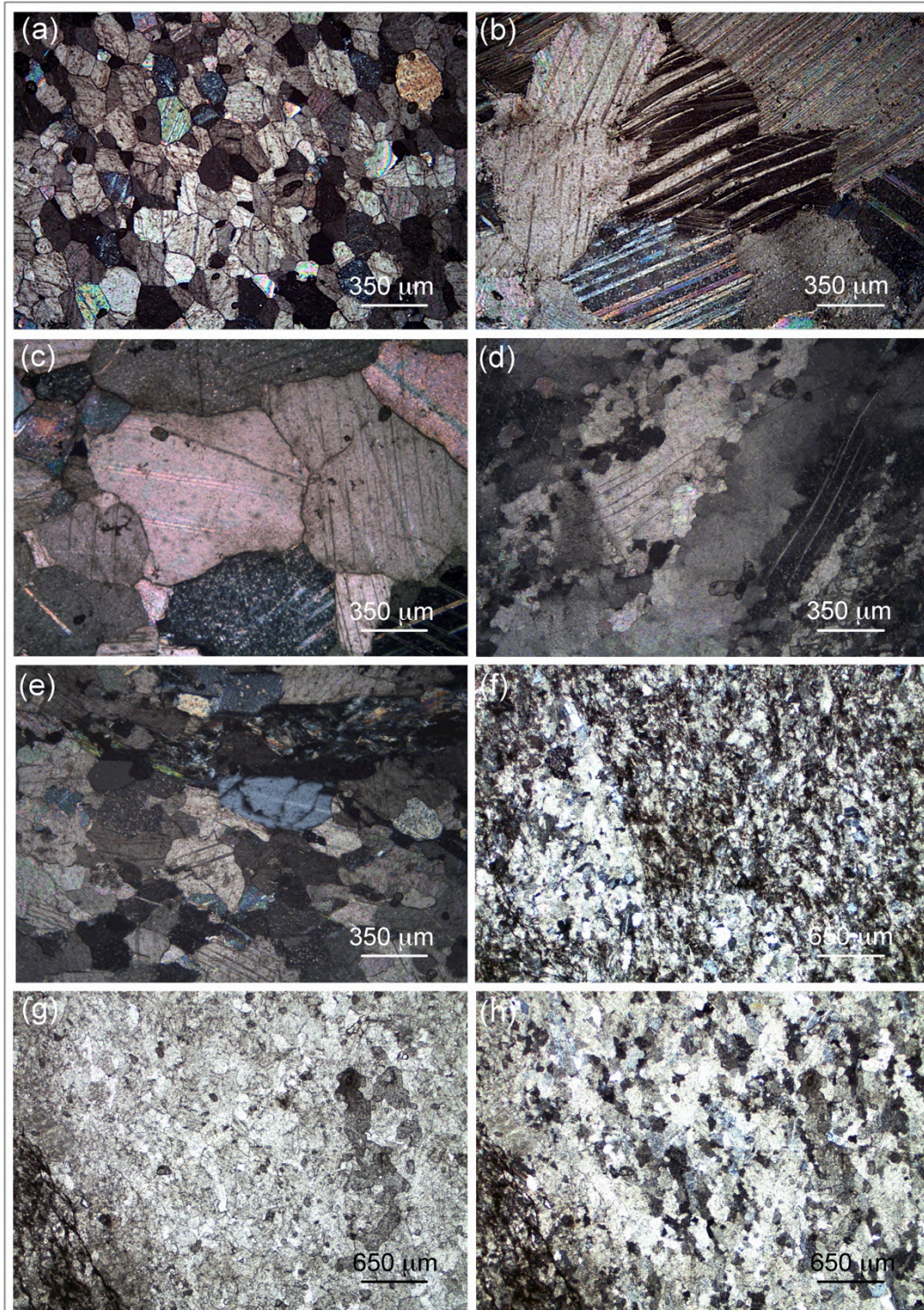


Figura 8.1.3.2: Caratteristiche microscopiche dei marmi: (a) marmo bianco con MGS < 2, campione SS112, (b), marmo bianco con MGS > 2, campione SS34, (c) marmo bianco con MGS > 2, campione SS35, (d) marmo bigio, campione SS63, (e) marmo cipollino (SS78), (f, g, h) marmo Rosso Antico (SS11). Da Columbu et al. 2018c.

Alcuni marmi colorati (Fig. 8.1.3.2d, e, f, g, h), sono stati riconosciuti macroscopicamente mentre altri in sezione sottile. I litotipi SS63, SS33, SS36 sono stati momentaneamente classificati come marmi bigi o marmi di Lesbo (Fig. 8.1.3.2d) in attesa dei riscontri isotopici (Paragrafo 8.7).

I marmi bigi in sezione sottile presentano una matrice micrometrica di colore grigio dovuta alla presenza di materia organica carboniosa.

Il campione SS78 (Fig. 8.1.3.2e), è classificabile come marmo cipollino. In sezione sottile presenta la classica struttura saccaroide con cristalli calcitici di circa 250 μm di dimensione.

Nel marmo cipollino sono presenti inoltre minerali opachi attribuibili a magnetite ed allineamenti di cristalli di clorite ed epidoto.

Il marmo cipollino proviene da cave situate sulla costa sud-occidentale dell'isola di Eubea, (Grecia) tra le attuali città di Styra e Karystos. Utilizzato già dai Greci, fu importato poi a Roma a partire dal I secolo AC come dimostrato da Plinio il Vecchio, nella sua *Naturalis Historia* del 78 DC.

Per quanto riguarda il campione SS11 (Fig. 8.1.3.2f, g, h), in sezione sottile si rileva una struttura saccaroide con cristalli di dimensione media 100 μm associati alla presenza di una frazione micrometrica di ematite che conferisce una colorazione microscopica e macroscopica rossa.

In sezione sottile si rinvencono anche cristalli di serpentino con dimensioni di medie 100 μm . Le caratteristiche microscopiche e macroscopiche di questo marmo conducono ad una classificazione del litotipo come marmo Rosso Antico, le cui cave, prossime al mare, si trovano sul promontorio di capo Matapan (anticamente capo Tenaro) nel Peloponneso. L'utilizzo del Rosso Antico in epoca Romana è diffuso a partire dalla fine del II secolo AC, mentre a Roma è diffuso a partire dall'età Cesariana e fino in età Bizantina (Borghini 1992).

8.1.4 Malte

La stratigrafia archeologica della Basilica di San Saturnino, evidenziata dai tematismi in Fig. 5.3.2a Capitolo 5, consiste in almeno tre diversi periodi storici caratterizzati da una diversa frequentazione dell'area e quindi anche da diversi caratteri architettonici e differenti fasi costruttive. Al fine di indagare le tecnologie di produzione e la provenienza delle materie prime tra malte di periodi diversi, nel monumento sono state campionate 9 malte Romane (II-IV sec. DC) e 9 malte Romaniche medievali (XI-XII sec. DC).

Entrambi i gruppi di malta sono stati ulteriormente suddivisi in base alla funzione adottata nell'edificio come da Tab. 8.1.4.1. Le malte consistono in calcestruzzi pavimentali, malte di allettamento di conci/laterizi, riempimenti di cortine murarie ed intonaci (e.g., rinzaffo, arriccio ed intonachino).

Macroscopicamente, le malte Romane sono caratterizzate da diverse colorazioni (Fig. 8.1.4.1a, b, c, d). Si varia da bruno chiaro in spazio colore CIELAB 64*-2*16 per le malte di allettamento di conci/laterizi e riempimenti di cortine, ad una colorazione più chiara CIELAB 77*-2*3 per le malte di intonaco.

In Tab. 8.1.4.1 si riportano i valori percentuali di aggregato delle malte campionate.

In sezione sottile, il legante in entrambi i gruppi di malta appare scarsamente coeso e presenta, in alcuni casi, fratturazioni da ritiro con larghezza di circa 250 μm e una spaziatura di 1,5 mm. Il 3-4% vol. di legante consiste in grumi di tipo stracotto idratato ed agglomerati di legante (Fig. 8.1.4.2a), secondo la classificazione dei grumi adottata da Pecchioni et al. (2018). La presenza di questa tipologia di grumi indica una non uniforme temperatura nel forno di cottura della calce e un insufficiente mescolamento dell'impasto (Pecchioni et al. 2018).

Come riportato nella Tab. 8.1.4.1, nelle malte Romane l'aggregato è composto da litoclasti, bioclasti e da cristallo-clasti sialici e mafici.

I litoclasti sono rappresentati per il 90% da frammenti di arenarie (Fig. 8.1.4.2b, c, d), con componente argillosa variabile e dimensioni da sub-millimetriche a centimetriche e grado di circolarità $C > 0,5$. La restante parte dei litoclasti (10%) consiste di ciottoli con $C > 0,5$.

In tutte le sezioni di malta Romana, la componente fossilifera è rappresentata da bioclasti appartenenti a foraminiferi, gasteropodi, bivalvi e coralli. I cristallo-clasti sono rappresentati da fasi quarzoso-feldspatiche (sialiche) con quarzo prevalente, plagioclasti e K-feldspati subordinati spesso alterati in minerali argillosi (Fig. 8.4.1.2g).

Le fasi mafiche invece sono rappresentate da clinopirosseni, opachi e biotiti (Fig. 8.4.1.2h). I cristallo-clasti hanno dimensioni da sub-millimetriche a 1 mm con gradi di circolarità piuttosto elevati compresi in un intervallo $0,6 < C < 0,7$.

Malta	Campione	Funzione	Litoclasti	Bioclasti	Cristallo-clasti sialici	Cristallo-clasti mafici
			(%)	(%)	(%)	(%)
Malta Romana (II-IV sec. DC)	SS100	Allettamento conci/laterizi	5,2	1,6	93,1	0,1
	SS103	Allettamento conci/laterizi	5,8	1,2	92,9	0,1
	SS105	Allettamento conci/laterizi	3,9	3,9	91,7	0,5
	SS114	Allettamento conci/laterizi	1,0	3,1	95,9	0,0
	SS108	Riempimento cortina	3,5	0,0	95,5	1,0
	SS98	Riempimento cortina	3,6	1,8	94,1	0,5
	SS102	Rinzaffo	2,2	2,8	94,0	1,0
	SS101	Arriccio	0,0	0,0	99,9	0,1
	SS106	Intonachino	0,0	0,0	99,9	0,1
Malta Romanica (XI-XII sec. DC)	SS37	Calcestruzzo pavimentale	15,2	0,0	84,8	0,0
	SS38	Calcestruzzo pavimentale	20,0	0,0	79,2	0,8
	SS51	Allettamento conci/laterizi	4,3	0,0	94,7	1,0
	SS56	Allettamento conci/laterizi	2,3	0,5	97,2	0,0
	SS57	Allettamento conci/laterizi	4,8	1,2	94,0	0,0
	SS58	Allettamento conci/laterizi	2,6	0,6	95,8	1,0
	SS59	Allettamento conci/laterizi	2,1	0,0	96,5	1,4
	SS94	Riempimento cortina	0,0	0,0	99,8	0,2
	SS95	Riempimento cortina	0,0	0,3	99,7	0,0

Tabella 8.1.4.1: Analisi modale degli aggregati presenti nelle malte di San Saturnino espressi in percentuale su totale aggregato.

Gli aggregati sinora descritti non presentano particolare reattività chimica col legante carbonatico, tuttavia sono presenti alcuni bordi di reazione all'interfaccia litoclasti-legante nel campione SS100 in seguito indagati mediante tecnica SEM-EDS (Paragrafo 8.6).

All'interno delle malte Romane, si notano delle analogie per quanto riguarda la tipologia e la frazione volumetrica di aggregato tra i due gruppi-funzione di riempimenti cortine e malte di allettamento di conci/laterizi (Tab. 8.1.4.1). Nel primo i litoclasti rappresentano in media il 3,6% del totale, il 4% nel secondo. Negli stessi gruppi il restante aggregato è composto da cristallo-clasti, mediamente nel 94,8% e nel 93,4%, rispettivamente.

Sempre nelle malte Romane, il gruppo degli intonaci consiste in primo strato interno di rinzaffo (SS102) che presenta litoclasti (circa il 2%), bioclasti (circa 3%) e cristallo-clasti (circa 95%).

Il secondo strato (arriccio) e lo strato di finitura (intonachino) sono invece simili, con aggregato rappresentato quasi totalmente da cristallo-clasti sialici e molto limitatamente da cristallo-clasti mafici (<1%).

Le malte risalenti alla fase costruttiva Romanica sono caratterizzate da una colorazione macroscopica variabile dal grigio chiaro CIELAB 82*2*3 a grigio scuro in CIELAB 55*1*1 (Fig. 8.1.4.1e, f, g, h).

Il legante di queste malte risulta leggermente più coeso rispetto a quello delle malte Romane. Ciò è dovuto ad un minor numero di fessurazioni da ritiro e da una percentuale di grumi di calce (stracotti idratati ed agglomerati di legante) leggermente più bassa pari a 1-2% vol.

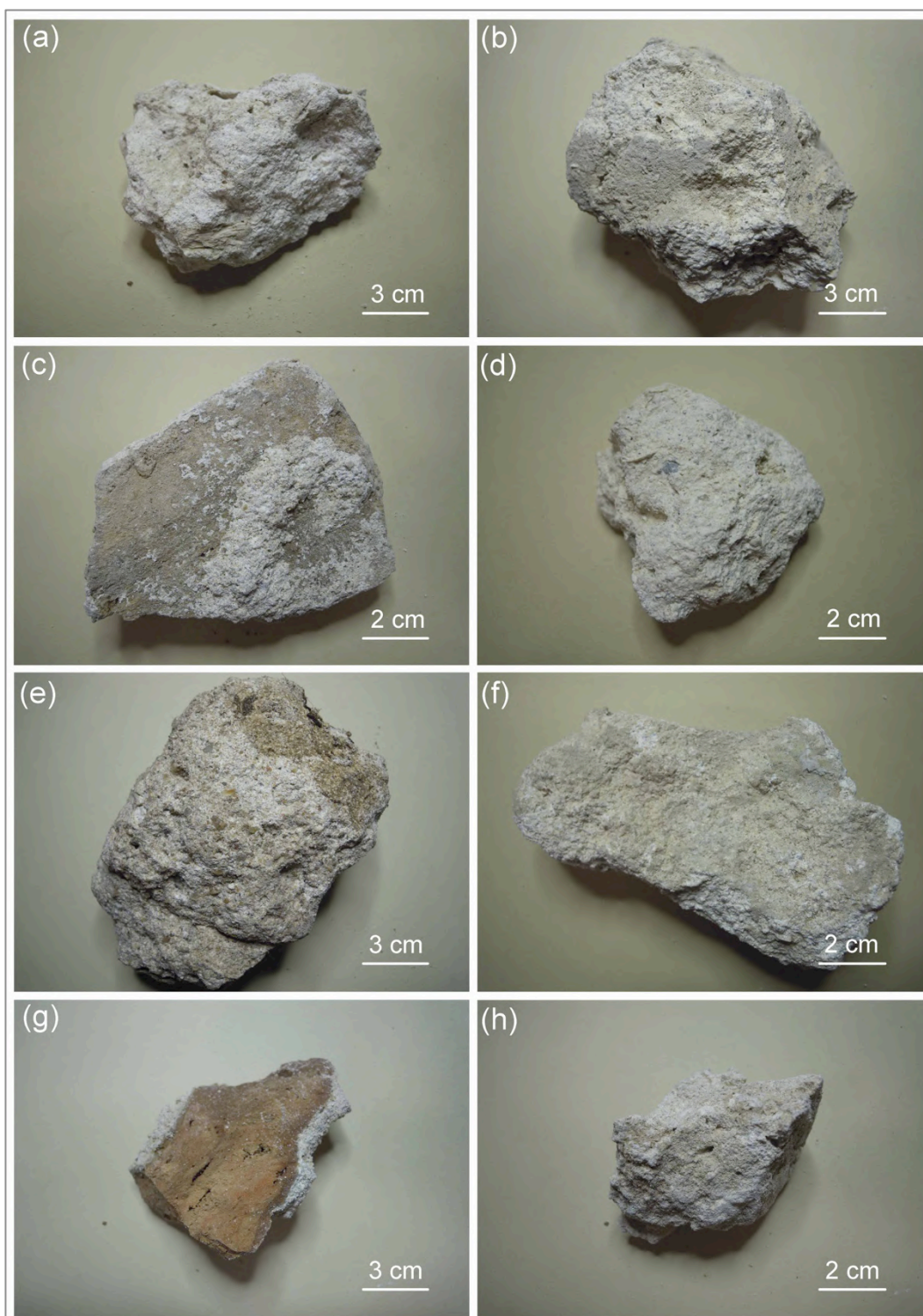


Figura 8.1.4.1: Caratteristiche macroscopiche delle malte di San Saturnino: (a), arriccio SS101, (b) intonachino SS106, (c) malta di allettamento dei conci/laterizi SS105, (d) riempimento di cortina muraria SS98, (e) riempimento di cortina muraria SS94, (f) malta di allettamento dei conci/laterizi SS56, (g) calcestruzzo SS37, (h) riempimento di cortina muraria SS95.

Nelle malte Romaniche, gli aggregati consistono in litoclasti (Fig. 8.1.4.3e, f), una frazione fossilifera (Fig. 8.4.1.3b, c) e cristallo-clasti sialici e mafici (Fig. 8.4.1.3a, d, g, h) di tipologia, dimensioni e gradi di circolarità simili a quelli identificati nelle malte Romane (Tab. 8.1.4.1).

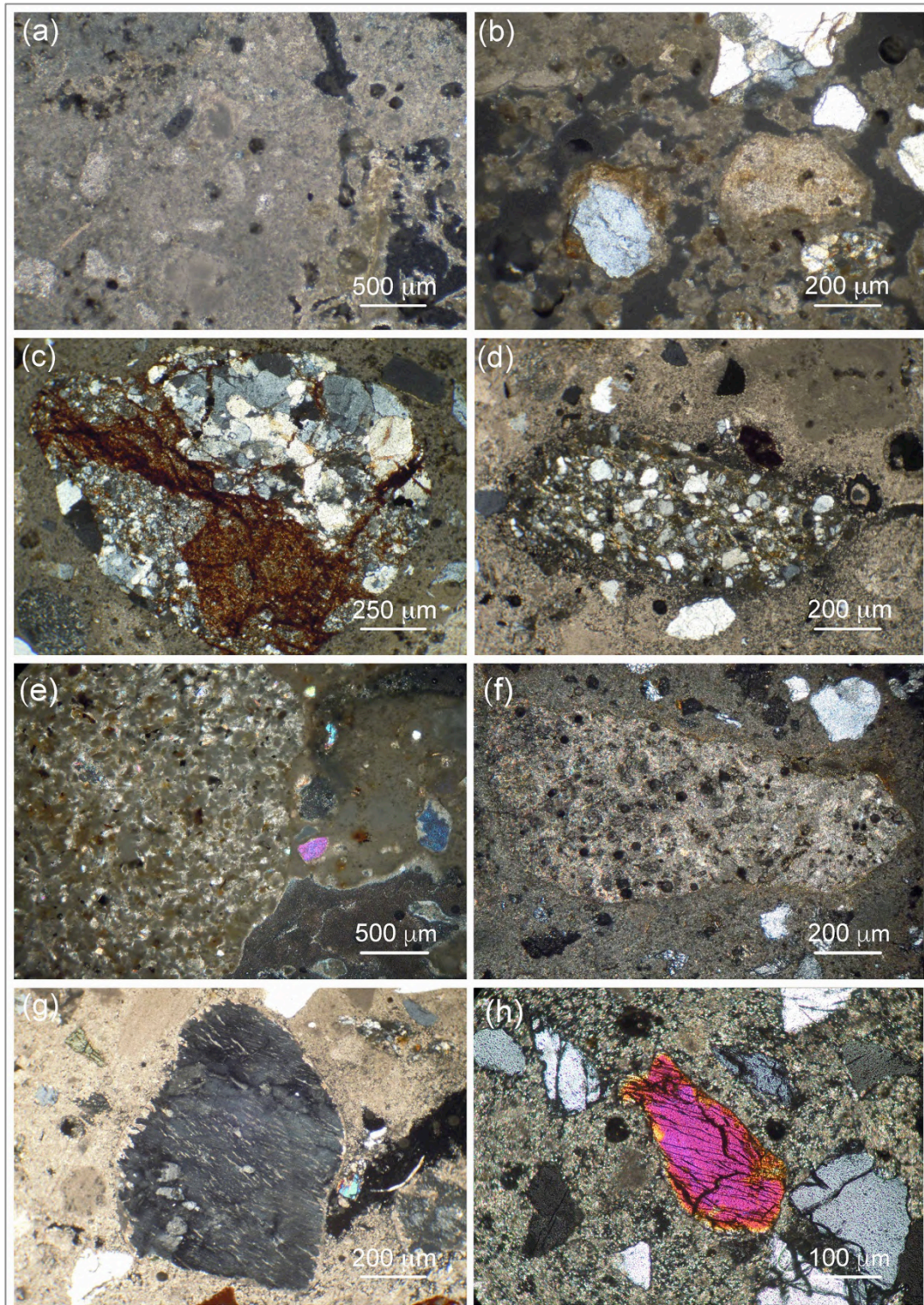


Figura 8.1.4.2: Caratteristiche microscopiche delle malte Romane: (a) grumo di calce nel campione SS106, (b) cristallo-clasti quarzoso-feldspatici e aggregato arenaceo in SS108, (c,d) aggregato arenaceo in SS100, (e) “fantasmi” di pietra Cantone (SS103), (f) “fantasmi” di pietra Forte (SS114), (g) cristallo-clasto di ortoclasio con alterazione in minerali argillosi (SS98), (h) cristallo-clasto di clinopirosseno in SS98.

Le malte di allettamento di conci e laterizi presentano un aggregato composto da litoclasti in percentuali variabili da circa 2 al 5%, una frazione di cristallo-clasti in percentuali da circa 94 a 97% ed una frazione fossilifera in percentuali mediamente inferiori a 1%.

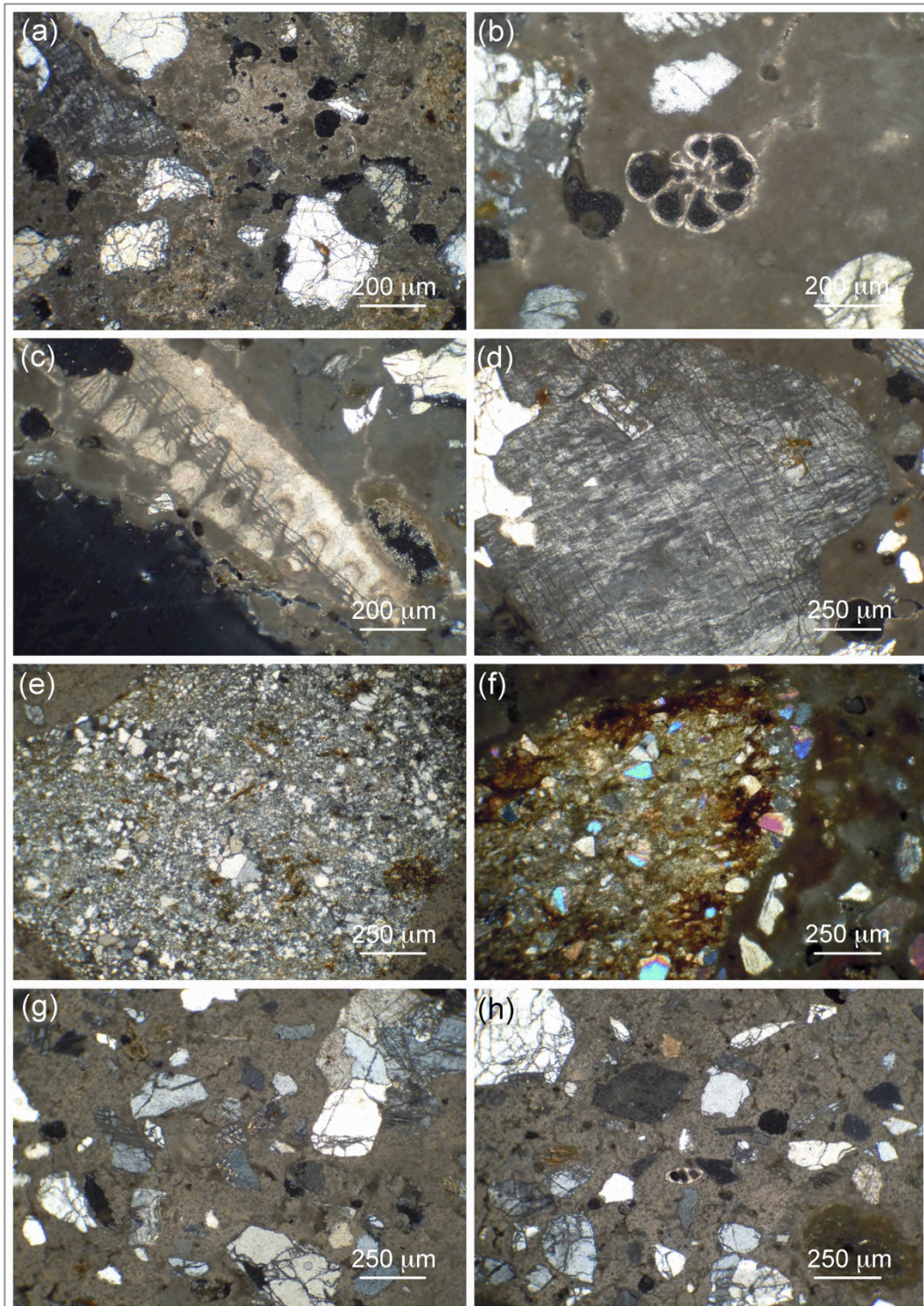


Figura 8.1.4.3: Caratteristiche microscopiche delle malte Romaniche: (a) aggregati di cristallo-clasti di quarzo in SS59, (b) bioclasti in SS58, (c) bioclasti in SS57, (d) cristallo-clasto di K-feldspato in SS94, (e) aggregati di litologia arenacea in SS51, (f) aggregati di litologia arenacea in SS38, (g) aggregati di cristallo-clasti quarzoso-feldspatici in SS95, (h) aggregati di cristallo-clasti quarzoso-feldspatici in SS58.

Come evidenziato nella Tab. 8.1.4.1, il gruppo dei calcestruzzi pavimentali Romanici mostra una quantità di litoclasti da circa 15 a 20% con cristallo-clasti in percentuali da circa 79 a 85%. In questo gruppo i bioclasti sono assenti.

Nelle malte Romaniche utilizzate come riempimenti di cortina muraria, i litoclasti sono assenti e l'aggregato è composto sostanzialmente da cristallo-clasti. La componente fossilifera è assente in SS94 mentre in SS95 è pari a 0,3% (Tab. 8.1.4.1).

Sebbene le malte Romane e Romaniche siano state prodotte a distanza di circa un millennio, l'osservazione in sezione sottile ha permesso di identificare caratteristiche abbastanza simili circa la percentuale e tipologia di aggregato utilizzato sulla base della funzione adottata nell'edificio.

L'aggregato è rappresentato prevalentemente da litoclasti e cristallo-clasti, la cui composizione e grado di circolarità suggeriscono un ambiente di sedimentazione ad alta energia, quale la battigia litorale. L'associazione fossilifera marina presente nelle malte conferma che probabilmente bioclasti e cristallo-clasti provengano da sabbie delle attuali spiagge di Giorgino e/o Poetto.

In particolare, in quest'ultimo arenile, il prelievo di sabbia utilizzata come inerte per la produzione di malte e cementi è proseguita nel tempo sino ad epoca contemporanea e documentata nelle città di Cagliari e Quartu sino agli anni 50-60.

Un aspetto compositivo curioso è che le malte di entrambe le culture non presentano aggregati pozzolanici (e.g. *Cocciopesto*, vulcaniti).

Pertanto, considerata l'assenza di una componente pozzolanica, l'idraulicità riscontrata nelle malte potrebbe essere conferita in gran parte del legante, ovvero dalla pietra utilizzata per la sua produzione.

Questa è stata identificata in sezione sottile analizzando alcuni frammenti calcarei che conservano la struttura della pietra da calce originaria a causa di una non adeguata cottura in fornace. Tali frammenti, rinominati come "fantasmi" da Pecchioni et al. (2018), appartengono alle litologie pietra Cantone e pietra Forte (Fig. 8.1.4.2e, f) e sono state osservate sui campioni SS103 ed SS114. Ciò indica che le due rocce fossero utilizzate non solo per la realizzazione dei conci del monumento ma anche per la produzione di leganti. In particolare la pietra Cantone, con il suo contenuto in minerali argillosi pari al 5-15% vol. ed una porosità efficace di circa 20% (vedi Paragrafo 8.2.1), è un calcare impuro in grado di conferire buone proprietà idrauliche alla malta. Come si accennava già nel Capitolo 3, l'utilizzo della pietra Cantone per la produzione di malte e cementi è avvenuto sino ad epoca contemporanea in alcune cave nell'area metropolitana di Cagliari.

8.2 Proprietà fisico-meccaniche

Per la caratterizzazione fisica delle rocce e delle malte sono state determinate una serie di proprietà fondamentali (densità, porosità, grado di assorbimento, etc.) nel monitoraggio e nella diagnostica dei materiali lapidei.

Alcune di queste proprietà (i.e., porosità aperta o interconnessa, geometria e tortuosità dei pori), regolano la mobilità dei fluidi circolanti nelle murature, il loro stazionamento e il loro ciclo di evaporazione, che è strettamente legato al processo ciclico di cristallizzazione-solubilizzazione salina che si dimostra essere uno dei principali agenti di degrado delle murature.

8.2.1 Pietra Cantone, pietra Forte e Vulcanite

Le litologie vulcaniche (andesiti) e sedimentarie (pietra Cantone, pietra Forte) di San Saturnino, che si differenziano cromaticamente in “Opera Bicroma”, presentano nette differenze anche nelle principali proprietà fisiche.

Le litologie calcaree pietra Cantone e pietra Forte mostrano differenze legate alle loro caratteristiche deposizionali. Esse si distinguono sulla base dei valori di densità reale ed apparente come da Tab. 8.2.1.1, Fig. 8.2.1.1a, b, c. La pietra Cantone è caratterizzata da una densità reale ed una densità apparente pari a $\rho_R = 2,70 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ e $\rho_B = 2,13 \pm 0,06 \text{ g/cm}^3$ mentre nella pietra Forte si ha $\rho_R = 2,70 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$ e $\rho_B = 2,50 \pm 0,11 \text{ g/cm}^3$ (Tab. 8.2.1.1).

Le rocce differiscono per valori di porosità totale media di $23,5 \pm 2,01\%$ (Tab. 8.2.1.1) per la pietra Cantone mentre soltanto $10,2 \pm 3,59\%$ nella pietra Forte, una differenza di circa 50%. Differente è inoltre la configurazione dei pori nelle rocce; nella pietra Forte infatti, i macrofossili sono posti in contatto lasciando degli spazi liberi che si traducono in valori di porosità chiusa media di 3,0% (Tab. 8.2.1.1, Fig. 8.2.1.1c). Nella pietra Cantone invece, la matrice micritica risulta compatta con pori chiusi che raggiungono percentuali medie di 2,4%.

I coefficienti d’imbibizione nella pietra Cantone e nella pietra Forte, determinati a seguito della prova di assorbimento per immersione totale, sono anch’essi differenti: pari a $8,7 \pm 0,98\%$ e $2,7 \pm 1,64\%$ rispettivamente, una differenza del 70% circa (Tab. 8.2.1.1, 8.1.1.2)

Gli indici di saturazione risultano sempre $< 100\%$ in entrambi i litotipi (Fig. 8.2.1.1d).

Ancora a differenziare i due calcari risultano le caratteristiche meccaniche con la resistenza a punzonamento media della pietra Forte di $3,27 \pm 1,20 \text{ MPa}$ vs $1,18 \pm 0,22 \text{ MPa}$ nella pietra Cantone, differenze attribuite alla radicale differenza di coesione fra i due litotipi (Tab. 8.2.1.3, Fig. 8.2.1.1e, f).

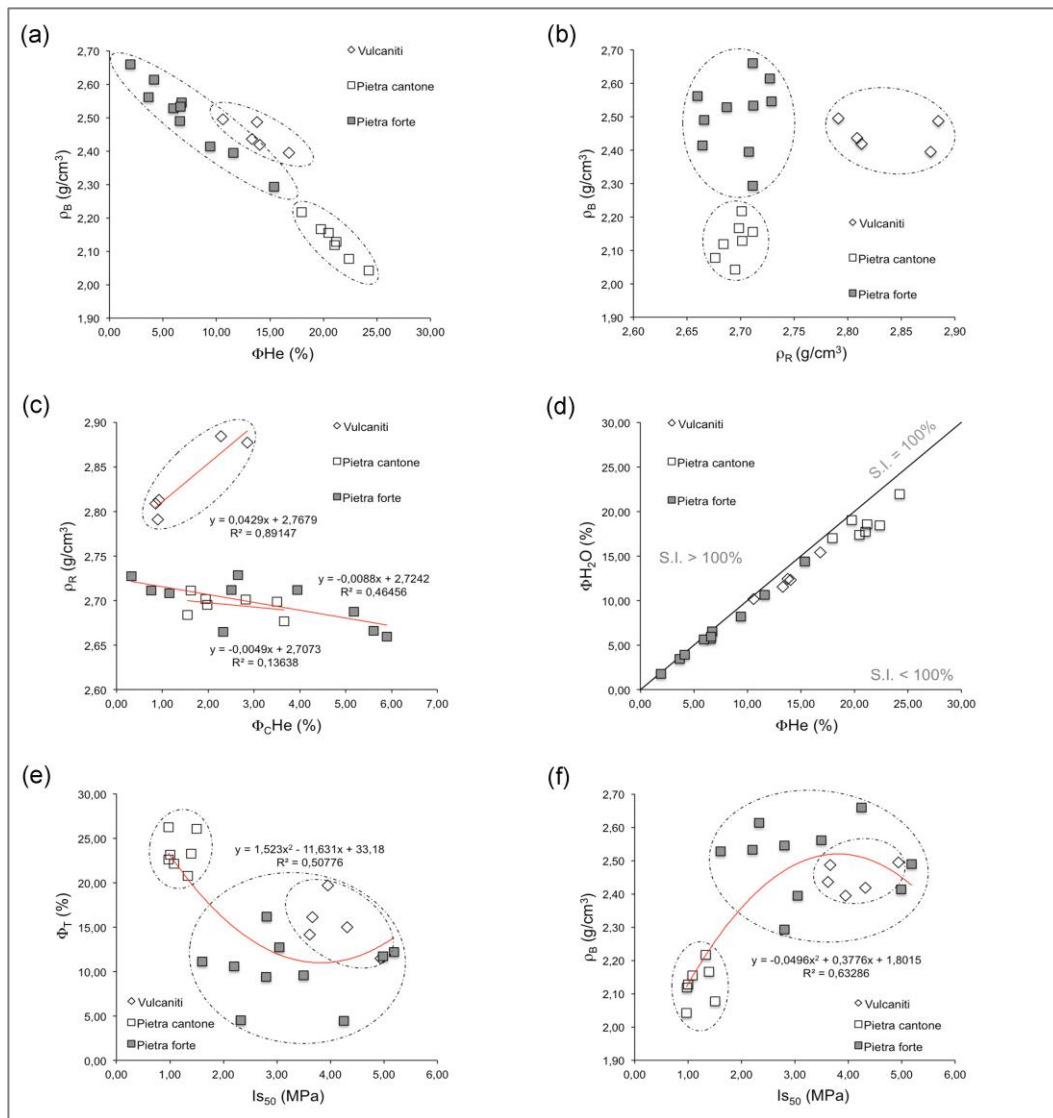


Figura 8.2.1.1: Caratterizzazioni fisico-meccaniche sulle pietre di San Saturnino: (a) porosità aperta all'elio vs densità apparente, (b) densità reale vs densità apparente, (c) porosità chiusa all'elio vs densità apparente, (d) porosità aperta all'elio vs porosità aperta all'acqua, (e) indice di resistenza al punzonamento vs porosità totale, (f) indice di resistenza al punzonamento vs densità apparente.

Le vulcaniti (andesiti) hanno densità reali elevate con media di $2,83 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ (Tab 8.2.1.1, Fig. 8.2.1.1b). La densità apparente media dei cinque campioni risulta $2,45 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$.

La densità del solido ($\rho_s = 2,88 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$) rispecchia la composizione mineralogica della roccia caratterizzata da un elevato indice di porfiricità (38-40%, Paragrafo 8.1.2) per fenocristalli di plagioclasti ($2,68 \text{ g/cm}^3$) e fasi minerali con alto peso specifico quali pirosseni ($3,2\text{-}3,5 \text{ g/cm}^3$), opachi (e.g., magnetite, $5,2 \text{ g/cm}^3$), olivine (4 g/cm^3) e orneblende brune ($3,2\text{-}3,4 \text{ g/cm}^3$).

Campione	Litologia	Umidità	Densità	Densità	Densità	Coefficiente	Porosità	Porosità	Porosità	Porosità	Indice	Indice di
		<i>in situ</i>	reale	apparente	solido	Imbibizione	aperta all'elio	aperta all'acqua	chiusa	totale	dei vuoti	di saturazione
		U	ρ_R	ρ_B	ρ_S	CI_w	Φ_{He}	Φ_{H_2O}	Φ_{cHe}	Φ_T	e	S.I.
		(g/g)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	()	(%)
SS25	Vulcanite	0,03	2,88	2,49	2,95	5,00	13,80	12,44	2,28	16,08	0,19	90,17
SS50		0,04	2,81	2,44	2,83	4,72	13,30	11,50	0,85	14,15	0,16	86,46
SS54		0,04	2,81	2,42	2,84	5,08	14,04	12,28	0,92	14,96	0,18	87,49
SS55		0,03	2,88	2,39	2,96	6,44	16,79	15,42	2,86	19,65	0,24	91,81
SS62		0,03	2,79	2,50	2,82	4,07	10,60	10,16	0,90	11,49	0,13	95,84
Media aritmetica		0,03	2,83	2,45	2,88	5,06	13,71	12,36	1,56	15,27	0,18	90,35
Deviazione standard	0,01	0,04	0,04	0,07	0,87	2,21	1,93	0,94	2,98	0,04	3,73	
SS19	Pietra Cantone	0,09	2,71	2,16	2,76	8,05	20,49	17,35	1,62	22,11	0,28	84,69
SS28		0,08	2,70	2,13	2,75	8,71	21,21	18,54	1,94	23,15	0,30	87,43
SS31		0,08	2,68	2,08	2,77	8,87	22,39	18,43	3,65	26,05	0,35	82,31
SS40		0,09	2,68	2,12	2,73	8,35	21,06	17,70	1,55	22,60	0,29	84,07
SS44		0,09	2,69	2,04	2,75	10,73	24,23	21,92	1,98	26,21	0,35	90,45
SS91		0,09	2,70	2,22	2,78	7,68	17,93	17,03	2,82	20,75	0,26	94,93
SS118		0,08	2,70	2,17	2,79	8,77	19,75	19,01	3,51	23,26	0,30	96,22
Media aritmetica		0,09	2,70	2,13	2,76	8,74	21,01	18,57	2,44	23,45	0,30	88,59
Deviazione standard	0,01	0,01	0,06	0,02	0,98	1,99	1,64	0,88	2,01	0,03	5,45	
SS1	Pietra Forte	0,01	2,66	2,56	2,82	1,34	3,67	3,43	5,90	9,57	0,11	93,41
SS2		0,02	2,67	2,49	2,82	2,29	6,58	5,69	5,61	12,18	0,14	86,55
SS4		0,01	2,71	2,29	2,73	6,27	15,39	14,39	0,76	16,16	0,19	93,47
SS6		0,01	2,73	2,61	2,74	1,50	4,15	3,91	0,33	4,48	0,05	94,23
SS13		0,02	2,73	2,55	2,80	2,58	6,72	6,56	2,65	9,37	0,10	97,62
SS23		0,01	2,71	2,39	2,74	4,43	11,59	10,61	1,16	12,75	0,15	91,55
SS30		0,01	2,69	2,53	2,83	2,22	5,94	5,61	5,18	11,12	0,12	94,39
SS60		0,03	2,71	2,66	2,78	0,67	1,94	1,79	2,51	4,45	0,05	92,27
SS107		0,01	2,66	2,41	2,73	3,40	9,39	8,22	2,32	11,71	0,13	87,52
SS109		0,03	2,71	2,53	2,82	2,35	6,62	5,96	3,95	10,57	0,12	89,94
Media aritmetica		0,02	2,70	2,50	2,78	2,70	7,20	6,62	3,04	10,24	0,12	92,10
Deviazione standard	0,01	0,03	0,11	0,04	1,64	3,99	3,68	2,03	3,59	0,04	3,34	

Tabella 8.2.1.1: Proprietà fisiche delle rocce, Basilica di San Saturnino.

Campione	Litologia	Assorbimento (%)									
		8,64 e10 ⁴ s	17,28 e10 ⁴ s	25,92 e10 ⁴ s	34,56 e10 ⁴ s	43,20 e10 ⁴ s	51,84 e10 ⁴ s	60,48 e10 ⁴ s	69,12 e10 ⁴ s	77,76 e10 ⁴ s	
SS25	Vulcanite	4,48	4,71	4,77	4,88	4,83	4,89	4,94	4,98	5,00	
SS50		4,09	4,26	4,38	4,66	4,68	4,67	4,69	4,72	4,72	
SS54		4,27	4,76	5,00	5,05	5,06	5,08	5,08	5,09	5,08	
SS55		5,34	5,70	5,90	6,20	6,37	6,40	6,42	6,43	6,44	
SS62		3,72	3,89	3,92	4,03	4,05	4,05	4,06	4,07	4,07	
SS19		Pietra Cantone	7,01	7,85	7,95	7,99	8,04	8,04	8,03	8,05	8,05
SS28	5,97		6,82	7,56	8,32	8,42	8,49	8,61	8,69	8,71	
SS31	6,72		7,53	7,89	8,11	8,50	8,70	8,81	8,84	8,87	
SS40	7,42		8,12	8,18	8,24	8,28	8,30	8,31	8,34	8,35	
SS44	8,99		10,54	10,63	10,67	10,69	10,70	10,72	10,73	10,73	
SS91	6,81		7,49	7,51	7,54	7,59	7,63	7,65	7,67	7,68	
SS118	7,38		8,34	8,47	8,65	8,68	8,72	8,76	8,72	8,77	
SS1	Pietra Forte		1,06	1,22	1,32	1,29	1,31	1,32	1,34	1,33	1,34
SS2			1,66	1,79	1,91	2,08	2,25	2,27	2,28	2,29	2,29
SS4		5,62	5,99	6,13	6,16	6,18	6,21	6,23	6,26	6,27	
SS6		1,15	1,32	1,40	1,43	1,46	1,48	1,48	1,49	1,50	
SS13		1,94	2,32	2,44	2,48	2,53	2,56	2,58	2,57	2,58	
SS23		3,64	4,03	4,07	4,21	4,28	4,35	4,39	4,42	4,43	
SS30		1,71	1,91	2,07	2,14	2,16	2,17	2,17	2,20	2,22	
SS60		0,48	0,55	0,59	0,61	0,63	0,65	0,66	0,67	0,67	
SS107		3,06	3,15	3,21	3,26	3,31	3,34	3,39	3,41	3,40	
SS109		1,50	1,98	2,10	2,22	2,27	2,32	2,33	2,35	2,35	

Tabella 8.2.1.2: Prova di assorbimento per immersione totale delle rocce, Basilica di San Saturnino.

La porosità totale media (Φ_T) della vulcanite è pari a $15,3 \pm 2,98\%$ (Tab. 8.2.1.1, Fig. 8.2.1.1f) suddivisa in porosità aperta (Φ_{He}) con una media di $13,7 \pm 2,2\%$ e in porosità chiusa (Φ_{CHe}) con una media di $1,6 \pm 0,94\%$. Nella vulcanite il totale della porosità è perciò rappresentata per circa il 90,2% da porosità efficace e per il restante 9,8% da porosità chiusa.

La prova di assorbimento per immersione totale delle andesiti indica che la saturazione completa del materiale avviene dopo circa 6 giorni col raggiungimento di un coefficiente di imbibizione medio $CI_w = 5,06 \pm 0,87\%$ (Tab. 8.2.1.1, 8.2.1.2).

L'indice di saturazione medio presenta valori di $90,4 \pm 3,73\%$.

Le caratteristiche meccaniche delle vulcaniti indicano un materiale fortemente resistente con $R_t = 5,12 \pm 0,69$ MPa, $R_c = 65,52 \pm 8,78$ MPa ed una resistenza a punzonamento di $4,10 \pm 0,55$ MPa (Tab. 8.2.1.3, Fig. 8.2.1.1e, f).

Campione	Litologia	Resistenza al punzonamento	Resistenza a compressione	Resistenza a trazione
		I_{50} (MPa)	R_c (MPa)	R_t (MPa)
SS25	Vulcanite	3,66	58,53	4,57
SS50		3,62	57,84	4,52
SS54		4,32	69,07	5,40
SS55		3,95	63,15	4,93
SS62		4,94	79,02	6,17
Media aritmetica		4,10	65,52	5,12
Deviazione standard	0,55	8,78	0,69	
SS19	Pietra Cantone	1,08	15,10	1,35
SS28		1,00	14,00	1,25
SS31		1,50	21,03	1,88
SS40		0,98	13,68	1,22
SS44		0,97	13,58	1,21
SS91		1,33	18,67	1,67
SS118		1,39	19,51	1,74
Media aritmetica		1,18	16,51	1,47
Deviazione standard		0,22	3,14	0,28
SS1	Pietra Forte	3,50	55,93	4,37
SS2		5,18	82,94	6,48
SS4		2,81	39,29	3,51
SS6		2,33	32,60	2,91
SS13		2,80	39,17	3,50
SS23		3,05	42,70	3,81
SS30		1,60	22,43	2,00
SS60		4,25	67,93	5,31
SS107		4,99	79,79	6,23
SS109		2,20	30,81	2,75
Media aritmetica		3,27	49,36	4,09
Deviazione standard	1,20	21,19	1,50	

Tabella 8.2.1.3: Caratteristiche meccaniche delle pietre, Basilica di San Saturnino.

8.2.2 Malte

Le malte della Basilica, suddivise in Romane e Romaniche, presentano proprietà fisiche strettamente connesse alla funzione che il materiale adotta nella struttura.

Nelle malte Romane e Romaniche di allettamento dei conci/laterizi le densità reali presentano valori di 2,55 g/cm³ e 2,61 g/cm³ rispettivamente (Tab. 8.2.2.1, Fig. 8.2.2.1b, c).

Le densità del solido (ρ_s) differiscono in maniera più marcata, con un valore medio di 2,70 g/cm³ nelle malte di allettamento Romane e 2,78 g/cm³ nelle Romaniche.

Differenza di densità tra gruppi con diversa funzione, come in questo caso, sono attribuibili ad un diverso rapporto legante/aggregato (L/A) della malta, dal momento che le percentuali di litoclasti, bioclasti e cristallo-clasti è del tutto simile (Tab. 8.1.4.1).

Nel Paragrafo 8.3 infatti, si nota che i rapporti L/A medi nelle malte di allettamento Romane è di 0,30 vs 0,43 nelle malte Romaniche.

Le malte Romane e Romaniche di allettamento dei conci/laterizi presentano coefficienti d'imbibizione medi molto simili con $CI_w = 20,4\%$ e $21,4\%$ rispettivamente (Tab. 8.2.2.1, 8.2.2.2) e porosità efficaci di $36,5\%$ e $37,5\%$ rispettivamente (Fig. 8.2.2a, d).

La resistenza meccanica al punzonamento risulta superiore nelle malte di allettamento Romaniche con ($Is_{50} = 0,80$ MPa) rispetto a quelle di fattura Romana ($Is_{50} = 0,70$ MPa, Tab. 8.1.4.1, Fig. 8.2.2d, e).

Per quanto riguarda il gruppo delle malte utilizzate nel riempimento delle cortine murarie, si registrano densità reali (ρ_R) medie pari a 2,56 g/cm³ nei riempimenti di fattura Romana e 2,57 g/cm³ in quelli di fattura medievale. Anche le densità del solido (ρ_s) sono simili con 2,74 g/cm³ nei riempimenti di fattura Romana e 2,72 g/cm³ in quelli di fattura medievale. Questa similitudine tra i due gruppi funzionali è data *in primis* da quantità e tipologia di aggregato (Tab. 8.1.4.1) e dai rapporti legante/aggregato simili (Tab. 8.3.1).

I due gruppi funzionali presentano invece coefficienti d'imbibizione leggermente differenti pari a $18,95\%$ nelle malte Romane e $14,4\%$ nelle malte Romaniche. Le porosità risultano di $35,3\%$ e 29% (Tab. 8.2.2.1).

Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche si registra $Is_{50} = 0,59$ MPa nelle malte di riempimento Romane e $0,62$ MPa nelle Romaniche, differenza attribuita alla diversa porosità di cui in precedenza.

Per quanto riguarda gli intonaci non è possibile effettuare confronti delle proprietà fisiche tra materiali di diverso periodo storico poiché non sono stati ritrovati intonaci su murature risalenti al medioevo.

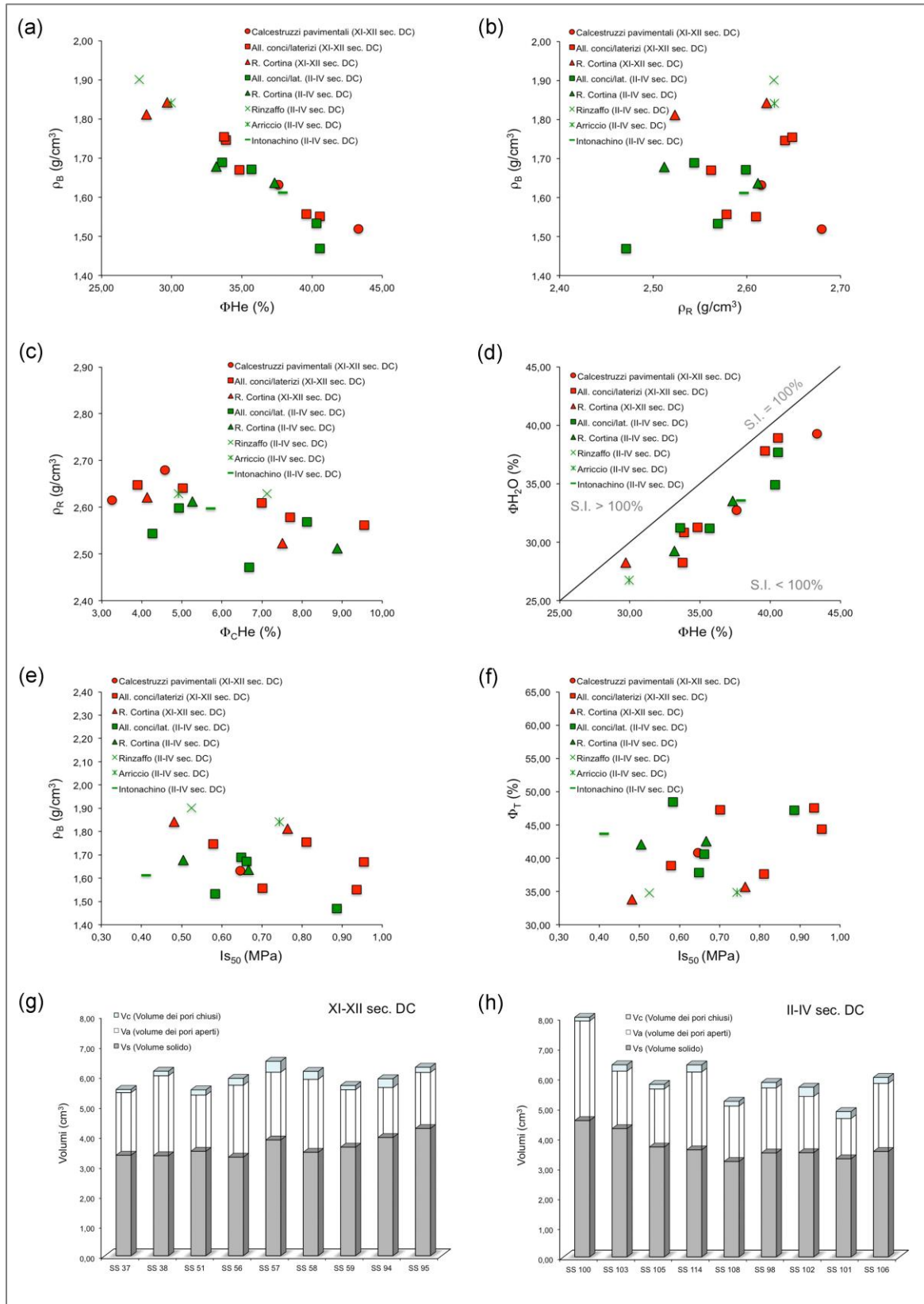


Figura 8.2.2.1: Caratterizzazione fisico-meccanica delle malte di San Saturnino: (a) porosità aperta all'elio vs densità apparente, (b) densità reale vs densità apparente, (c) porosità chiusa all'elio vs densità reale, (d) porosità aperta all'elio vs porosità aperta all'acqua, (e) indice di resistenza al punzonamento vs densità apparente, (f) indice di resistenza al punzonamento vs porosità totale, (g, h) volume della frazione solida (V_s), dei pori chiusi (V_c) ed aperti (V_a) nei campioni di malte Romaniche e Romane.

Campione	Malta	Funzione	Umidità	Densità	Densità	Densità	Coefficiente	Porosità	Porosità	Porosità	Porosità	Indice dei	Indice di
			<i>in situ</i>	reale	apparente	solido	Imbibizione	aperta all'elio	aperta all'acqua	chiusa	totale	vuoti	saturazione
			U	ρ_R	ρ_B	ρ_s	CI_w	Φ_{He}	Φ_{H_2O}	Φ_{cHe}	Φ_T	e	S.I.
			(g/g)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	()	(%)
SS100		Allettamento conci/laterizi	0,07	2,57	1,53	2,78	22,78	40,33	34,93	8,12	48,45	0,88	86,62
SS103		Allettamento conci/laterizi	0,06	2,54	1,69	2,65	18,49	33,59	31,24	4,26	37,85	0,59	93,02
SS105		Allettamento conci/laterizi	0,10	2,47	1,47	2,64	25,64	40,55	37,67	6,68	47,23	0,85	92,90
SS114	Malta Romana (II-IV sec. DC)	Allettamento conci/laterizi	0,07	2,60	1,67	2,73	18,66	35,68	31,19	4,92	40,60	0,66	87,44
SS108		Riempimento cortina	0,09	2,61	1,64	2,75	20,49	37,32	33,54	5,26	42,59	0,72	89,87
SS98		Riempimento cortina	0,07	2,51	1,68	2,73	17,41	33,17	29,23	8,88	42,05	0,69	88,10
SS102		Rinzaffo	0,08	2,63	1,90	2,82	12,88	27,69	24,48	7,13	34,82	0,52	88,40
SS101		Arriccio	0,06	2,63	1,84	2,76	14,53	29,96	26,76	4,92	34,88	0,52	89,33
SS106		Intonachino	0,10	2,60	1,61	2,75	20,82	37,92	33,57	5,72	43,64	0,74	88,52
SS37			Calcestruzzo pavimentale	0,05	2,62	1,63	2,70	20,05	37,60	32,73	3,26	40,86	0,68
SS38		Calcestruzzo pavimentale	0,08	2,68	1,52	2,80	25,84	43,31	39,26	4,57	47,89	0,88	90,65
SS51		Allettamento conci/laterizi	0,09	2,64	1,75	2,77	17,64	33,86	30,82	5,02	38,88	0,62	91,01
SS56	Malta Romanica (XI-XII sec. DC)	Allettamento conci/laterizi	0,07	2,61	1,55	2,79	25,08	40,56	38,91	6,99	47,55	0,86	95,93
SS57		Allettamento conci/laterizi	0,06	2,56	1,67	2,81	18,72	34,82	31,27	9,55	44,37	0,75	89,80
SS58		Allettamento conci/laterizi	0,10	2,58	1,56	2,78	24,28	39,61	37,82	7,69	47,31	0,84	95,47
SS59		Allettamento conci/laterizi	0,09	2,65	1,75	2,75	16,09	33,74	28,25	3,89	37,63	0,59	83,71
SS94		Riempimento cortina	0,06	2,52	1,81	2,71	13,45	28,19	24,37	7,50	35,70	0,53	86,43
SS95		Riempimento cortina	0,07	2,62	1,84	2,73	15,32	29,70	28,24	4,14	33,84	0,50	95,11

Tabella 8.2.2.1: Proprietà fisiche delle malte, Basilica di San Saturnino

Campione	Malta	Funzione	Assorbimento (%)								
			8,64 e10 ⁴ s	17,28 e10 ⁴ s	25,92 e10 ⁴ s	34,56 e10 ⁴ s	43,20 e10 ⁴ s	51,84 e10 ⁴ s	60,48 e10 ⁴ s	69,12 e10 ⁴ s	77,76 e10 ⁴ s
SS100	Malta Romana (II-IV sec. DC)	Allettamento conci/laterizi	18,35	22,54	22,64	22,68	22,70	22,75	22,76	22,77	22,78
SS103		Allettamento conci/laterizi	14,30	18,71	18,17	18,37	18,41	18,46	18,48	18,50	18,49
SS105		Allettamento conci/laterizi	19,70	24,58	24,75	25,10	25,35	25,42	25,58	25,60	25,64
SS114		Allettamento conci/laterizi	13,89	17,86	18,38	18,52	18,59	18,59	18,61	18,62	18,66
SS108		Riempimento cortina	16,04	19,82	20,15	20,35	20,42	20,46	20,47	20,48	20,49
SS98		Riempimento cortina	14,44	17,16	17,26	17,34	17,38	17,39	17,41	17,41	17,41
SS102		Rinzaffo	10,49	12,57	12,68	12,74	12,78	12,81	12,84	12,86	12,88
SS101		Arriccio	9,87	13,90	14,26	14,40	14,47	14,48	14,51	14,60	14,53
SS106		Intonachino	16,27	20,46	20,68	20,71	20,78	20,80	20,81	20,81	20,82
SS37	Malta Romanica (XI-XII sec. DC)	Calcestruzzo pavimentale	13,37	16,82	18,03	18,46	19,02	19,27	19,58	19,81	20,05
SS38		Calcestruzzo pavimentale	20,39	25,73	25,76	25,78	25,78	25,79	25,81	25,82	25,84
SS51		Allettamento conci/laterizi	14,82	17,47	17,52	17,56	17,60	17,62	17,63	17,65	17,64
SS56		Allettamento conci/laterizi	19,75	24,76	24,90	25,03	25,07	25,07	25,09	25,08	25,08
SS57		Allettamento conci/laterizi	14,23	17,50	17,96	18,25	18,43	18,51	18,60	18,68	18,72
SS58		Allettamento conci/laterizi	17,97	22,99	23,66	24,14	24,15	24,17	24,24	24,26	24,28
SS59		Allettamento conci/laterizi	12,27	15,07	15,69	15,89	15,99	16,05	16,07	16,08	16,09
SS94		Riempimento cortina	10,79	12,38	13,22	13,24	13,32	13,35	13,40	13,43	13,45
SS95		Riempimento cortina	11,05	14,46	15,15	15,22	15,25	15,27	15,31	15,32	15,32

Tabella 8.2.2.2: Prova di assorbimento per immersione totale delle malte, Basilica di San Saturnino

Gli intonaci (i.e., rinzaffo e arriccio) del periodo Romano (campioni SS102 e SS101), presentano caratteristiche simili con coefficienti d'imbibizione di 12,9% e 14,5% ed una porosità totale di 34,8% e 34,9% (Tab. 8.2.2.1). L'intonachino mostra una densità reale di 2,60 g/cm³, una densità apparente di 1,61 g/cm³ ed una densità del solido di 2,75 g/cm³.

Il coefficiente d'imbibizione è pari a 20,8%, mentre la porosità totale è pari a 43,6%.

In Fig. 8.2.2.1g, h sono mostrati i volume della frazione solida (V_s), dei pori chiusi (V_c) ed aperti (V_a) nei campioni di malte Romaniche e Romane.

Campione	Litologia	Funzione	Resistenza a	Resistenza a	Resistenza a
			punzonamento	compressione	trazione
			I _{s50}	R _c	R _t
			MPa	MPa	MPa
SS100	Malta Romana (II-IV sec. DC)	Allettamento conci/laterizi	0,58	8,17	0,73
SS103		Allettamento conci/laterizi	0,65	9,08	0,81
SS105		Allettamento conci/laterizi	0,89	12,41	1,11
SS114		Allettamento conci/laterizi	0,66	9,27	0,83
SS108		Riempimento cortina	0,67	9,32	0,83
SS98		Riempimento cortina	0,50	7,06	0,63
SS102		Rinzaffo	0,53	7,35	0,66
SS101		Arriccio	0,74	10,41	0,93
SS106		Intonachino	0,41	5,77	0,52
SS37		Malta Romanica (XI-XII sec. DC)	Calcestruzzo pavimentale	0,65	9,05
SS38	Calcestruzzo pavimentale		1,04	14,56	1,30
SS51	Allettamento conci/laterizi		0,58	8,10	0,72
SS56	Allettamento conci/laterizi		0,94	13,10	1,17
SS57	Allettamento conci/laterizi		0,95	13,36	1,19
SS58	Allettamento conci/laterizi		0,70	9,82	0,88
SS59	Allettamento conci/laterizi		0,81	11,35	1,01
SS94	Riempimento cortina		0,76	10,69	0,95
SS95	Riempimento cortina		0,48	6,75	0,60

Tabella 8.2.2.3: Caratteristiche meccaniche delle malte, Basilica di San Saturnino

8.3 Caratteristiche granulometriche dell'aggregato mediante setaccio (PSD)

Le caratteristiche granulometriche delle malte di San Saturnino sono riportate in Tab. 8.3.1, 8.3.2 ed 8.3.3. Gli istogrammi e le curve granulometriche di alcuni dei campioni più rappresentativi sono riportate in Fig. 8.3.1 per le malte Romane e Fig. 8.3.2 per le malte Romaniche. I rapporti L/A sono strettamente connessi alla funzione che le malte rivestono nella struttura.

Le malte di allettamento dei conci e laterizi di fattura Romana presentano rapporti legante/aggregato $0,23 < L/A < 0,38$ con media di 0,30 (Tab. 8.3.1).

Per quanto riguarda le malte di riempimento delle cortine murarie Romane, i campioni SS108 ed SS98 risultano abbastanza simili con $L/A = 0,88$ e $0,90$ rispettivamente.

Il rinzaffo SS102, primo strato interno d'intonaco appartenente al paramento murario, presenta $L/A = 0,37$ mentre negli strati successivi di arriccio e intonachino L/A risulta sensibilmente maggiore pari a $0,45$ e $6,11$ rispettivamente.

Le caratteristiche dei fusi granulometrici delle malte Romane (Tab. 8.3.2, 8.3.3), mostrano come gli allettamenti dei conci/laterizi siano un gruppo fortemente eterogeneo con trattenuto più elevato ai due setacci di $1000 - 2000 \mu\text{m}$ in SS100, $250 - 500 \mu\text{m}$ in SS103 (Fig. 8.3.1a, b), $2000 - 4000 \mu\text{m}$ in SS105, e $2000 - 1000 \mu\text{m}$ in SS114.

In questo gruppo si rileva un coefficiente di uniformità $3,33 < U < 10$ per granulometrie tipo vario in SS100, 105 e 114, uniformi in SS103 (Tab. 8.3.3).

Nelle malte Romane di riempimento delle cortine murarie SS108 ed SS98 si assiste a granulometrie uniformi con coefficiente $U = 4,95$ e $3,76$ rispettivamente. I due campioni si dimostrano differenti nelle quantità di trattenuto massimo con $1000 - 500 \mu\text{m}$ in SS108 (Fig. 8.3.1c, d), e $250 - 500 \mu\text{m}$ in SS98 evidenziando granulometrie degli aggregati di tipo sabbioso grossolano e sabbioso medio rispettivamente.

Nel gruppo degli intonaci, il rinzaffo SS102 (Fig. 8.3.1e, f), è costituito da aggregato a grana fine con trattenuto massimo ai setacci di $250 - 500 \mu\text{m}$ e $U = 2,31$ (granulometria uniforme).

Nell'arriccio SS101 un coefficiente di uniformità U pari a $5,90$ (Tab. 8.3.3), indica una granulometria varia con trattenuto massimo ai setacci di $1000 - 2000 \mu\text{m}$ (sabbia molto grossolana).

L'intonachino di finitura SS106 (Fig. 8.3.1g, h), è caratterizzato da una bimodalità granulometrica marcata con trattenuto centrato ai setacci di $250 - 1000 \mu\text{m}$ con lacuna granulometrica sui $500 \mu\text{m}$.

Nel campione il coefficiente di uniformità è di $3,23$ ad evidenziare granulometrie di tipo uniforme.

Malta	Campione	Funzione	L/A	Trattenuto al setaccio (%)								
				8000µm	4000µm	2000µm	1000µm	500µm	250µm	125µm	63µm	<63µm
Malta Romana (II-IV sec. DC)	SS100	Allettamento conci/laterizi	0,23	0,00	9,09	20,79	25,38	18,11	17,81	6,98	1,71	0,13
	SS103	Allettamento conci/laterizi	0,30	2,37	4,47	8,64	23,22	27,64	31,09	2,57	0,00	0,00
	SS105	Allettamento conci/laterizi	0,27	2,51	25,73	29,57	13,11	11,16	9,73	4,95	3,21	0,04
	SS114	Allettamento conci/laterizi	0,38	0,00	3,86	33,28	21,48	10,39	16,18	11,82	2,82	0,17
	SS108	Riempimento cortina	0,88	0,00	2,28	10,09	34,33	20,63	18,86	9,00	4,10	0,71
	SS98	Riempimento cortina	0,90	0,00	2,50	8,01	17,93	19,54	33,20	11,53	4,04	3,25
	SS102	Rinzaffo	0,37	0,00	1,22	5,96	11,81	22,93	43,65	10,86	3,24	0,33
	SS101	Arriccio	0,45	0,00	2,97	22,67	22,79	18,59	18,68	12,96	1,18	0,16
SS106	Intonachino	6,11	0,00	0,00	4,66	18,64	8,60	41,94	15,77	10,39	0,00	
Malta Romanica (XI-XII sec. DC)	SS37	Calcestruzzo pavimentale	1,50	0,00	2,22	9,97	34,76	21,35	19,92	7,53	4,07	0,17
	SS38	Calcestruzzo pavimentale	1,58	0,00	12,38	16,63	21,41	17,55	19,08	9,14	2,70	1,12
	SS51	Allettamento conci/laterizi	0,66	0,00	4,47	8,73	13,70	12,63	42,09	15,61	2,20	0,57
	SS56	Allettamento conci/laterizi	0,30	0,00	3,93	22,48	36,51	18,66	9,09	7,85	1,42	0,07
	SS57	Allettamento conci/laterizi	0,33	5,32	7,60	24,41	32,78	14,73	8,02	5,97	1,08	0,08
	SS58	Allettamento conci/laterizi	0,53	6,42	5,15	18,82	29,31	15,60	11,77	9,31	2,71	0,90
	SS59	Allettamento conci/laterizi	0,33	0,00	8,11	21,47	31,86	17,60	9,00	8,68	2,35	0,92
	SS94	Riempimento cortina	0,92	0,00	6,61	21,75	16,32	7,46	26,60	17,09	3,72	0,46
	SS95	Riempimento cortina	0,83	0,00	1,49	13,40	15,30	14,39	41,57	13,71	0,13	0,00

Tabella 8.3.1: Rapporto Legante/Aggregato e percentuale di trattenuto al relativo setaccio.

Malta	Campione	Funzione	Passante cumulativo (%)								
			8000µm	4000µm	2000µm	1000µm	500µm	250µm	125µm	63µm	<63µm
Malta Romana (II-IV sec. DC)	SS100	Allettamento conci/laterizi	100,00	98,78	92,82	81,01	58,08	14,43	3,57	0,33	0,00
	SS103	Allettamento conci/laterizi	97,63	93,15	84,51	61,29	33,66	2,57	0,00	0,00	0,00
	SS105	Allettamento conci/laterizi	97,49	71,76	42,19	29,08	17,93	8,19	3,24	0,04	0,00
	SS114	Allettamento conci/laterizi	100,00	96,14	62,86	41,38	30,99	14,81	2,99	0,17	0,00
	SS108	Riempimento cortina	100,00	97,72	87,64	53,30	32,68	13,82	4,81	0,71	0,00
	SS98	Riempimento cortina	100,00	97,50	89,49	71,56	52,02	18,82	7,29	3,25	0,00
	SS102	Rinzaffo	100,00	97,03	75,35	52,57	23,98	14,30	1,34	0,16	0,00
	SS101	Arriccio	100,00	98,78	92,82	81,01	58,08	14,43	3,57	0,33	0,00
	SS106	Intonachino	100,00	100,00	95,34	76,70	68,10	26,16	10,39	0,00	0,00
Malta Romanica (XI-XII sec. DC)	SS37	Calcestruzzo pavimentale	100,00	97,78	87,81	53,05	31,69	11,77	4,24	0,17	0,00
	SS38	Calcestruzzo pavimentale	100,00	87,62	70,99	49,58	32,03	12,95	3,81	1,12	0,00
	SS51	Allettamento conci/laterizi	100,00	95,53	86,80	73,10	60,47	18,38	2,77	0,57	0,00
	SS56	Allettamento conci/laterizi	100,00	96,07	73,59	37,09	18,42	9,34	1,49	0,07	0,00
	SS57	Allettamento conci/laterizi	94,68	87,08	62,67	29,89	15,15	7,14	1,16	0,08	0,00
	SS58	Allettamento conci/laterizi	93,58	88,43	69,61	40,30	24,69	12,92	3,61	0,90	0,00
	SS59	Allettamento conci/laterizi	100,00	91,89	70,41	38,55	20,95	11,95	3,26	0,92	0,00
	SS94	Riempimento cortina	100,00	93,39	71,64	55,32	47,87	21,27	4,19	0,46	0,00
	SS95	Riempimento cortina	100,00	98,51	85,11	69,81	55,42	13,85	0,13	0,00	0,00

Tabella 8.3.2: Passanti cumulativi al relativo setaccio.

Le malte Romaniche sono identificabili in 2 calcestruzzi pavimentali SS37 ed SS38 caratterizzati da un rapporto legante/aggregato pari a 1,50 e 1,58 rispettivamente (Tab. 8.3.1).

Malta	Campione	Funzione	Diametro determinante al 60% D ₆₀ (µm)	Diametro determinante al 10% D ₁₀ (µm)	Coefficiente di uniformità U=D ₆₀ /D ₁₀	Tipo di granulometria
Malta Romana (II-IV sec. DC)	SS100	Allettamento conci/laterizi	1450	270	5,37	Varia
	SS103	Allettamento conci/laterizi	1000	300	3,33	Uniforme
	SS105	Allettamento conci/laterizi	3000	300	10	Varia
	SS114	Allettamento conci/laterizi	1900	200	9,5	Varia
	SS108	Riempimento cortina	990	200	4,95	Uniforme
	SS98	Riempimento cortina	640	170	3,76	Uniforme
	SS102	Rinzaffo	510	220	2,31	Uniforme
	SS101	Arriccio	1300	220	5,90	Varia
	SS106	Intonachino	420	130	3,23	Uniforme
Malta Romanica (XI-XII sec. DC)	SS37	Calcestruzzo pavimentale	1000	240	4,16	Uniforme
	SS38	Calcestruzzo pavimentale	1350	220	6,13	Varia
	SS51	Allettamento conci/laterizi	500	200	2,5	Uniforme
	SS56	Allettamento conci/laterizi	1500	280	5,35	Varia
	SS57	Allettamento conci/laterizi	1900	350	5,42	Varia
	SS58	Allettamento conci/laterizi	1200	210	5,71	Varia
	SS59	Allettamento conci/laterizi	1500	220	6,81	Varia
	SS94	Riempimento cortina	1100	175	6,28	Varia
	SS95	Riempimento cortina	580	230	2,52	Uniforme

Tabella 8.3.3: Diametri determinanti D₁₀ - D₆₀ e coefficienti d'uniformità U dell'aggregato analizzato.

Nelle malte Romaniche di allettamento di conci/laterizi si assiste a rapporti L/A compresi fra 0,30 e 0,66 con media di 0,43, mentre nei riempimenti di cortina SS94 ed SS95, L/A = 0,92 e 0,83 rispettivamente.

Nel gruppo dei calcestruzzi pavimentali il campione SS37 è caratterizzato da trattenuti molto elevati ai setacci 1000 - 500 µm con una granulometria di tipo uniforme (Tab. 8.3.1, 8.3.3).

In SS38 (Fig. 8.3.2a, b), la granulometria è di tipo vario (U = 6,13) ed è caratterizzata da percentuali di trattenuto centrate a 1000 – 250 µm con leggera lacuna granulometrica al setaccio di 500 µm.

La Tab. 8.3.1 mostra come nei campioni di malta Romanica di allettamento dei conci/laterizi (ad esclusione del campione SS51), la maggior parte del trattenuto sia concentrato ai setacci 1000 – 2000 µm (Fig. 8.3.2c, d). In questi campioni, si identificano granulometrie di tipo vario. Uniforme è invece la granulometria di SS51 (U = 2,5) che si discosta dal gruppo per la presenza di una elevata quantità di trattenuto a 250 µm (Fig. 8.3.2e, f).

Nelle malte di riempimento delle cortine murarie Romaniche il campione SS94 mostra una bimodalità con il massimo del trattenuto ai 250 – 2000 µm con lacune nei setacci intermedi e granulometria di tipo vario (U = 6,28). Si nota come il campione sia costituito da una miscela di sabbia molto grossolana ed una sabbia a granulometria media. In SS95 invece si assiste a una

granulometria uniforme con $U = 2,52$ data dalla presenza di un trattenuto di 41,57% (circa metà della massa totale dell'aggregato) trattenuta al setaccio di 250 μm .

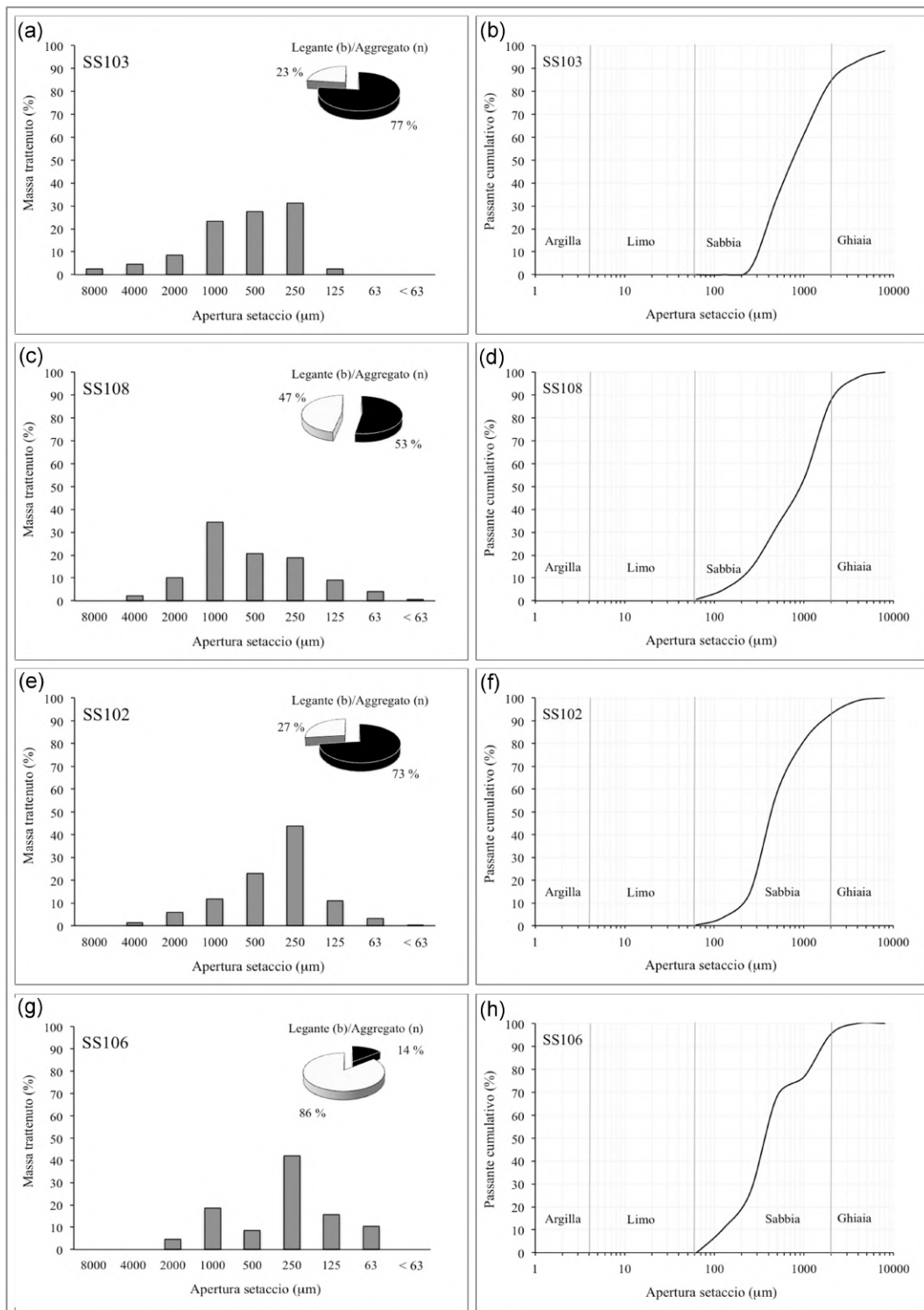


Figura 8.3.1: Esempi d'istogrammi di trattenuto ai setacci e curve cumulative in 4 malte Romane: (a, b) malta di allettamento dei conci/laterizi SS103, (b, c) riempimento di cortina muraria SS108, (e, f) rinforzo SS102, (g, h) intonachino SS106.

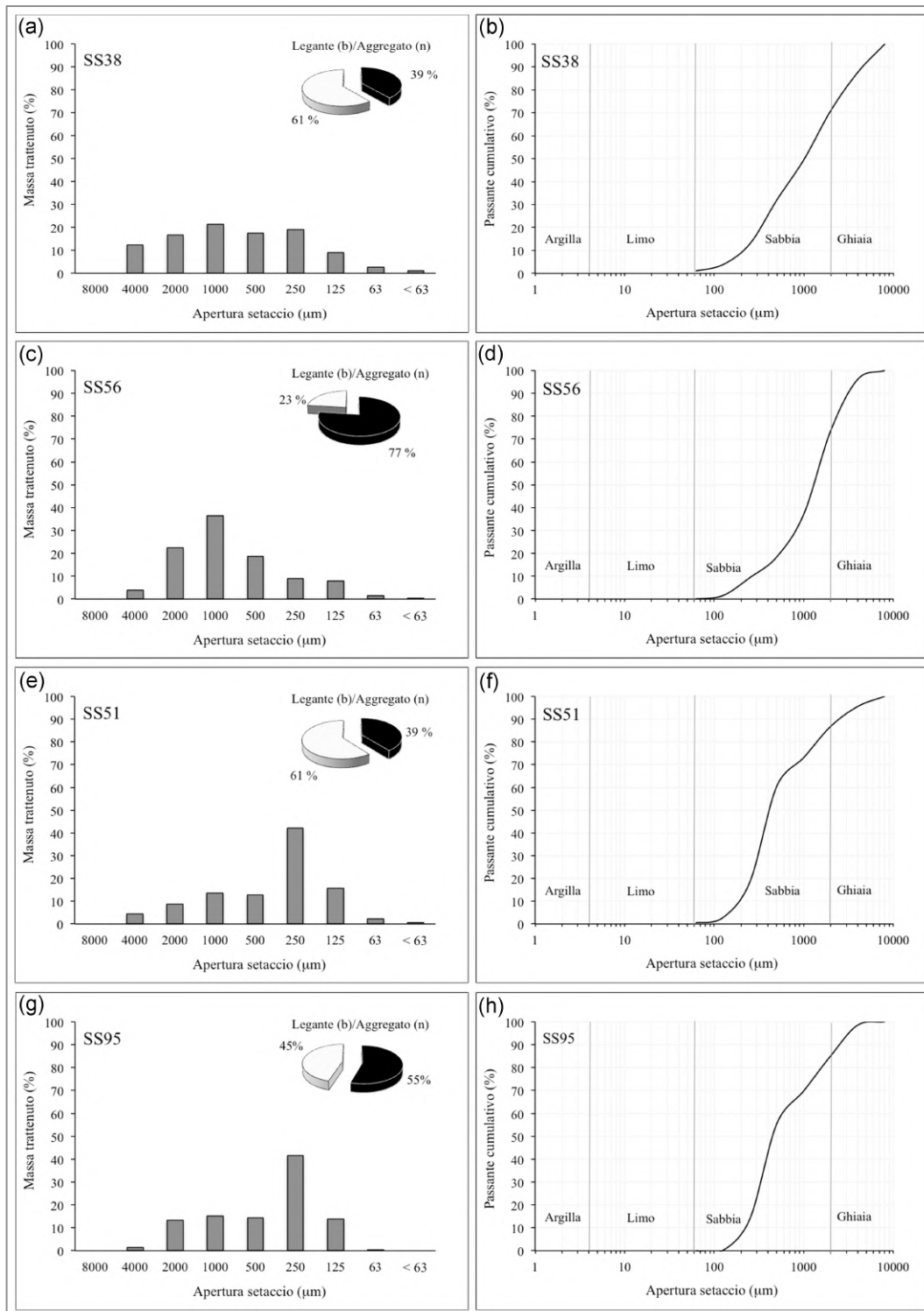


Figura 8.3.2: Esempi d'istogrammi di trattenuto ai setacci e curve cumulative in 4 malte Romaniche: (a, b) calcestruzzo pavimentale SS38, (c, d) malta di allettamento dei conci/laterizi SS56, (e, f) malta di allettamento dei conci/laterizi SS51, (g, h) riempimento di cortina muraria SS95.

8.4 Diffrazione a Raggi X sulle malte (XPRD)

La diffrazione ai raggi X sulle malte di San Saturnino è stata utile ad identificare fasi minerali secondarie di alterazione (o minerali accessori) non osservabili per via microscopica, appartenenti alle frazioni legante ed aggregato e prodotti di deposizione superficiale (Tab. 8.4.1).

Le malte Romane (Fig. 8.4.1a, b, c, d), sono costituite in prevalenza da calcite e da fasi quarzoso-feldspatiche derivanti dall'aggregato di sabbia marina, probabilmente proveniente dalle spiagge più prossime al monumento come già trattato nel paragrafo 8.1.4.

Oltre la calcite sono stati rilevati due polimorfi di carbonato di calcio quali: vaterite nel campione SS105 (Fig. 8.4.1c), aragonite nei campioni SS114 (Fig. 8.4.1d) ed SS98. La presenza di vaterite ed aragonite nei cementi e nelle malte storiche e contemporanee è ben documentata (Lezzerini 1996, Signorelli et al. 1996, Stepkowska et al. 2003), e sarebbe attribuibile in parte ai bioclasti. In questo caso, infatti, entrambi i campioni presentano un contenuto di bioclasti di circa il 3 e 2% (Tab. 8.1.4.1).

Secondo Cole & Kroone (1960) la formazione dei due polimorfi di CaCO_3 sarebbe inoltre dovuta alla temperatura di carbonatazione della portlandite Ca(OH)_2 . Calcite e vaterite sono entrambi polimorfi di bassa temperatura (30 °C) ma già a 40 °C la vaterite diventa predominante. Sempre a 40 °C si forma anche l'aragonite la quale diventa predominante a 60-80 °C. In ogni caso, ad ogni temperatura e col passare del tempo, i due polimorfi di CaCO_3 tendono comunque a trasformarsi in calcite più stabile.

Nelle malte Romane è stato identificato gesso, come prodotto di solfatazione del carbonato di calcio ad opera di soluzioni acquose aggressive in presenza di anidride solforosa (dovute alle emissioni antropiche cittadine), o per reazione dell'anione solfato derivante dagli aerosol marini (provenienti dai quadranti meridionali) con la portlandite (Ca(OH)_2) secondo la reazione [1] (ESA, External Sulphate Attack, Ikumi et al. 2019). A conferma di tale seconda ipotesi, misurazioni effettuate mediante satellite (dati portale meteorologico GIOVANNI, National Aeronautics and Space Administration), mostrano che nell'area di San Saturnino è presente un contenuto medio mensile di spray marino (M_{Spray}) relativamente elevato dell'ordine di $3,26 \cdot 10^{-8} < M_{\text{Spray}} < 3,61 \cdot 10^{-8} \text{ Kg/m}^3$. I valori di deposizione mensile di spray marino sugli edifici non sono disponibili sul portale di cui sopra ma risultano elevati a causa di una velocità del vento media mensile di 15 Km/h (Dati Portale AM, Aeronautica Militare Italiana).

La presenza di spray marino in sospensione atmosferica è inoltre confermata da tracce di alite (NaCl) nei campioni SS103 e SS102 (Tab. 8.4.1).

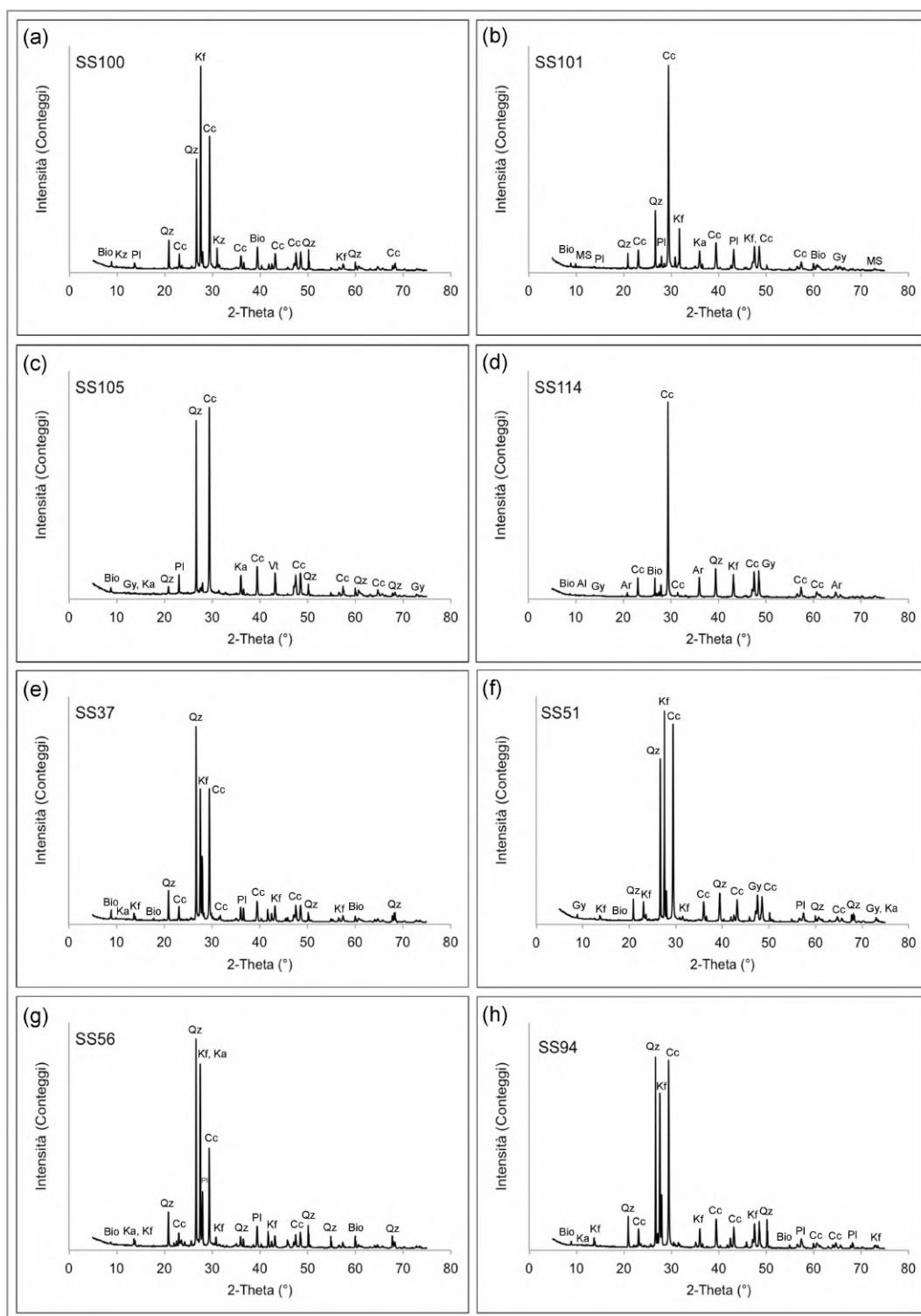


Figura 8.4.1: Esempi di diffrazione (XPRD) eseguita su malte Romane (a, b, c, d) e Romaniche (e, f, g, h).

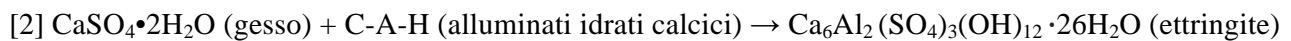
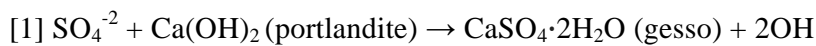
Cc = calcite, Qz = quarzo, Pl = plagioclasio, Kf = K-feldspato, Bio = biotite, Gy = gesso, Ka = caolinite, Al = alite, Vt = vaterite, Ar = aragonite, Kz = kuzelite, MS = monosolfato, Alu = aluminite.

Nella stessa tabella, si nota come la presenza di gesso e di cloruro di sodio sia più elevata nelle malte Romane. Ciò è dovuto al fatto che queste sono state campionate nella Necropoli Nord, area parzialmente esposta all'esterno, a differenza delle malte Romaniche che provengono in prevalenza dall'interno dell'edificio.

Nelle malte Romane sono stati trovati come fasi in traccia solfati idrati di calcio ed alluminio (i.e., kuzelite nel campione SS100) , come prodotto d'idratazione dell'ettringite (Hajilar 2015).

I due minerali appartengono alla stessa famiglia di composti secondari cementizi; in particolare l'ettringite deriva dalla reazione tra l'alluminato tricalcico (C₃A), che è uno dei componenti principali del legante pozzolanico, e i solfati di calcio idrati (gesso). Normalmente quest'ultima reazione può avvenire tra solfati calcici idrati già presenti nell'impasto o di origine esterna (Hajilar 2015, Collepari & Coppola 2015), come probabilmente è avvenuto nel nostro caso.

Il processo di formazione dell'ettringite inizia con lo ione solfato che reagisce con la portlandite generando gesso [1]. Successivamente quest'ultimo reagisce con gli alluminati idrati di calcio (C-A-H) con formazione dell'ettringite secondo la [2]:



Campione	Malta	Funzione	Cc	Qz	Pl	Kf	Bio	Gy	Ka	Al	Vt	Ar	Kz	MS	Alu
SS100		All. conci/lat.	••	••	••	••	•	Tr	-	-	-	-	Tr	-	-
SS103		All. conci/lat.	••	••	•	•	•	-	-	Tr	-	-	-	-	-
SS105		All. conci/lat.	••	••	•	•	•	Tr	•	-	Tr	-	-	-	-
SS114	Malta Romana	All. conci/lat.	•••	•	-	••	Tr	•	-	-	-	•	-	-	•
SS108	(II-IV sec. DC)	R. cortina	••	••	•	•	•	-	-	-	-	-	-	-	-
SS98		R. cortina	••	••	••	•	•	-	Tr	-	-	Tr	-	Tr	-
SS102		Rinzaffo	•••	••	•	••	Tr	Tr	Tr	Tr	-	-	-	-	-
SS101		Arriccio	•••	••	•	•	•	Tr	•	-	-	-	-	Tr	-
SS106		Intonachino	•••	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SS37		Calc. Pav.	••	•••	•	••	•	-	•	-	-	-	-	-	-
SS38		Calc. Pav.	••	•••	•	••	•	-	•	-	-	-	-	-	-
SS51		All. conci/lat.	••	••	•	••	•	Tr	•	-	-	-	-	-	-
SS56		All. conci/lat.	••	••	•	••	•	-	•	-	-	-	-	-	-
SS57	Malta Romanica	All. conci/lat.	••	••	••	•	•	-	Tr	-	-	-	-	-	-
SS58	(XI-XII sec. DC)	All. conci/lat.	••	•••	•	••	•	Tr	Tr	-	-	-	-	-	-
SS59		All. conci/lat.	••	••	•	•	•	-	Tr	-	-	-	-	-	-
SS94		R. cortina	••	••	••	••	•	-	Tr	-	-	-	-	-	-
SS95		R. cortina	••	•	••	••	•	-	Tr	-	-	-	-	-	-

Tabella 8.4.1: Analisi mineralogica semi-quantitativa delle malte (XPRD): ••• = Molto abbondante; •• = Abbondante; • = Presente; Tr = presente in tracce; - = Non rilevato.

Cc = calcite, Qz = quarzo, Pl = plagioclasio, Kf = K-feldspato, Bio = biotite, Gy = gesso, Ka = caolinite, Al = alite, Vt = vaterite, Ar = aragonite, Kz = kuzelite, MS = monosolfato, Alu = aluminite.

Altri solfati di calcio ed alluminio quali aluminite e/o monosolfato ritrovati nei campioni di malta Romana SS98, 102, 114 (Fig. 8.4.1d), derivano da un processo di formazione successivo a quello dell'ettringite, dove lo ione solfato durante la [1] inizia a scarseggiare formando composti più sempre più poveri di zolfo (Hajilar 2015).

Nelle malte Romaniche si ha una composizione mineralogica abbastanza semplice rappresentata dalla calcite e da fasi sialiche prevalenti (Tab. 8.4.1, Fig. 8.4.1e, f, g, h).

È inoltre rilevata la presenza di gesso in tracce nei campioni SS51 (Fig. 8.4.1b) ed SS58 che probabilmente rappresenta un prodotto di solfatazione del legante carbonatico.

La caolinite è presente in tutti i campioni di malta Romanica (Tab. 8.4.1, Fig. 8.4.1e, f, g, h) e deriva probabilmente dell'idrolisi dei plagioclasti e K-feldspati, processo, per altro, già osservato in sezione sottile sui cristallo-clasti. Parte della caolinite potrebbe inoltre provenire da frammenti “fantasmi” di pietra Cantone, litotipo che, come già specificato nel Paragrafo 8.1, presenta un certo contenuto di minerali argillosi singenetici (Columbu et al. 2017).

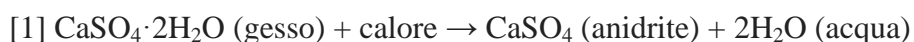
8.5 Analisi termo-gravimetrica (TGA) e termico-differenziale (DSC) sulla frazione legante

Le curve ottenute in analisi simultanea TGA/DSC sui leganti delle malte Romane e Romaniche mostrano la presenza di alcune perdite in peso caratteristiche.

L'andamento iniziale delle curve di decomposizione termica di Fig. 8.5.1a, c mostra una prima perdita in peso centrata a 30-50 °C dovuta all'evaporazione dell'acqua capillare (umidità), per altro confermata dalla termodinamica endotermica della reazione rilevabile nelle corrispondenti curve DSC di Fig. 8.5.1b, d.

La perdita in peso relativa all'acqua capillare è presente in tutti i campioni (Fig. 8.5.1a, c) sebbene in alcuni di questi risulta più elevata (e.g., SS95, SS108).

Un'ulteriore perdita in peso è rilevata in alcuni campioni come SS51, SS58, SS100, SS101, SS102, SS114 ed è dovuta al processo di disidratazione del gesso, presente in questi campioni e rilevato in diffrazione (Tab. 8.4.1), che a temperature di circa 90-120 °C si disidrata, eliminando parte dell'acqua (circa il 75% vol.) presente nella struttura chimica e producendo anidrite secondo la reazione [1]



Il processo di disidratazione del gesso può avvenire in un intervallo di 40 °C (90-130 °C) in base al grado di cristallinità della fase (Moropoulou 2000).

E' rilevabile solo in alcuni campioni (SS38, SS105, SS114, Fig. 8.5.1a, c) una perdita di peso pozzolanica, solitamente localizzata in un intorno di temperatura tra 480 e 550 °C associata alla perdita di anidride carbonica secondo la reazione [2]:



La calcite ed i silicati presenti nel legante reagiscono a formare silicati calcici e anidride carbonica (Columbu et al. 2016). Questa reazione è identificata nei diagrammi di Fig. 8.5.1b, d come un picco negativo associato ad una termodinamica endotermica.

La perdita in peso più estesa è registrata in un intervallo di temperatura tra 520 e 800 °C ed è legata alla decarbonatazione del legante calcitico secondo la reazione [3]:



Anche la perdita in peso legata alla reazione [3] risulta più o meno accentuata in base al campione, evidenziando quindi una discreta eterogeneità compositiva dei leganti. Piccole perdite in peso comprese fra 550 e 600 °C di termodinamica endotermica, sono visibili nei campioni SS38, SS57

ed SS95 e sarebbero imputabili al processo di disidratazione della caolinite con formazione di metacaolinite secondo la reazione [4].



Nella Tab. 8.5.1 sono riportati i valori delle perdite in peso di una malta in termo-gravimetria (secondo Bakolas et al., 1998, 1995 e Moropoulou et al. 2000) relative all'acqua ($\Delta\text{H}_2\text{O}\%$), stimata in un intervallo di temperatura tra 200-520 °C, e quelle relative all'anidride carbonica ($\Delta\text{CO}_2\%$), stimata in un intervallo tra 520-800 °C. Queste sono utili a calcolare il grado d'idraulicità del legante (e quindi della malta, Fig. 8.5.1 e, f).

Campione	Malta	Funzione	Peso perso per range di temperatura (%)		$\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{H}_2\text{O}$
			200-520 °C ($\Delta\text{H}_2\text{O}$)	520-800 °C (ΔCO_2)	
SS100		Allettamento conci/laterizi	3,36	24,26	7,22
SS103		Allettamento conci/laterizi	2,27	28,18	12,41
SS105		Allettamento conci/laterizi	2,64	22,16	8,39
SS114	Malta Romana (II-IV sec. DC)	Allettamento conci/laterizi	2,71	25,08	9,25
SS108		Riempimento cortina	6,13	19,75	3,22
SS98		Riempimento cortina	2,92	25,06	8,58
SS102		Rinzaffo	2,60	15,77	6,07
SS101		Arriccio	3,62	22,50	6,22
SS106		Intonachino	1,41	35,16	24,94
Media aritmetica			3,07	24,21	9,59
Deviazione standard			1,31	5,42	6,29
SS37		Calcestruzzo pavimentale	3,09	18,93	6,13
SS38		Calcestruzzo pavimentale	4,97	17,87	3,60
SS51		Allettamento conci/laterizi	3,35	27,19	8,12
SS56	Malta Romanica (XI-XII sec. DC)	Allettamento conci/laterizi	5,08	11,12	2,19
SS57		Allettamento conci/laterizi	4,02	10,80	2,69
SS58		Allettamento conci/laterizi	2,61	15,36	5,89
SS59		Allettamento conci/laterizi	2,80	11,62	4,15
SS94		Riempimento cortina	2,09	25,34	12,12
SS95		Riempimento cortina	2,90	19,17	6,61
Media aritmetica			3,43	17,49	5,72
Deviazione standard			1,04	5,97	3,09

Tabella 8.5.1: Analisi termo-gravimetriche sui leganti delle malte: percentuale di peso perso in intervalli di temperatura 200-520 °C ($\Delta\text{H}_2\text{O}$) e 520-800 °C (ΔCO_2).

I campioni di malte Romane e Romaniche riuniti in una sola serie presentano un coefficiente di correlazione R^2 di tipo polinomiale pari a 0,89 (Fig. 8.5.1f).

Osservando la Tab 8.5.1 si nota un'idraulicità mediamente maggiore nei leganti delle malte Romaniche rispetto a quelli Romani con valori rispettivamente di $\Delta\text{CO}_2 = 17,49$ vs 24,21%.

La differenza è anche dovuta alla presenza nelle malte Romane dei campioni SS103 ed SS106 con basse idraulicità con valori di $\Delta\text{CO}_2 = 28,18$ e $35,15\%$ rispettivamente. In SS103 un valore così elevato di ΔCO_2 potrebbe essere dovuto alla presenza di un grumo di calce nel campione analizzato.

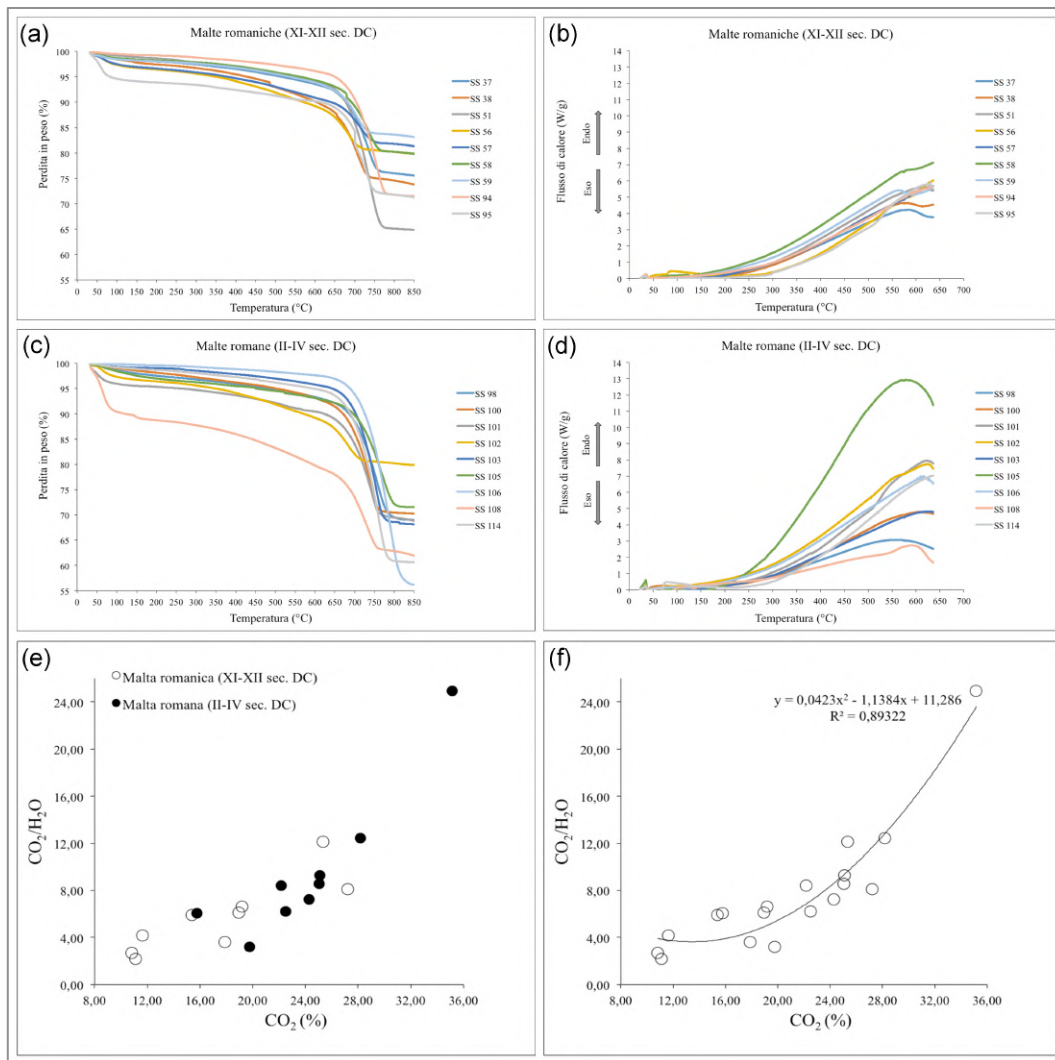


Figura 8.5.1: Analisi termo-gravimetriche e termiche-differenziali sulle malte: (a) curve di decomposizione termica delle malte Romaniche, (b) analisi termiche differenziali sulle malte Romaniche, (c) curve di decomposizione termica delle malte Romane, (d) analisi termiche differenziali sulle malte Romane, (e) rapporto $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ vs CO_2 per malte Romaniche e Romane, (f) rapporto $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ vs CO_2 per le malte analizzate riunite in una sola serie.

Nel campione SS106 invece la forte decarbonatazione del legante è dovuta sostanzialmente alle caratteristiche dell'intonachino, malta costituita per la quasi totalità da calce come dimostrato dal rapporto $L/A = 6,11$ (Tab. 8.3.1).

I gruppi-funzione delle malte di allettamento di conci/laterizi ed riempimenti di cortina muraria sono presenti sia nelle malte di fattura Romana che Romanica dando la possibilità di un confronto diretto tra i due gruppi sulla base dei valori di ΔCO_2 e $\Delta\text{H}_2\text{O}$.

Nelle malte di allettamento dei laterizi si rileva una perdita in peso media di $\Delta\text{CO}_2 = 15,22\%$ nelle

malte di fattura Romanica e 24,92% in quelle Romane (Tab. 8.5.1).

Tale differenza d'idraulicità, piuttosto marcata, potrebbe essere dovuta all'utilizzo di materie prime che conferiscono una pozzolanicità differente, ovvero la pietra Cantone, una biomicroite con tenori di argilla differenti (5-15% vol.) e la pietra Forte, un calcare quasi puro (0-2% vol., Paragrafo 8.1).

8.6 Analisi in microscopia elettronica SEM-EDS

L'analisi SEM-EDS è stata eseguita mediante microscopio elettronico a scansione previa osservazione microscopica su sezioni sottili (OM).

8.6.1 Rocce (pietra Cantone e pietra Forte)

Nelle litologie pietra Cantone e pietra Forte, l'analisi SEM-EDS ha avuto il fine di verificare la composizione di alcune fasi non risolvibili in OM.

In Fig. 8.6.1.1, l'osservazione congiunta OM e SEM-EDS su una sezione di pietra Cantone mostra la presenza di processi di solfatazione localizzati in alcune aree specifiche della roccia.

In Fig. 8.6.1.1a un'area di sezione sottile è osservata in OM mentre in Fig. 8.6.1.1b la stessa area è fotografata in elettroni secondari (SE).

In Fig. 8.6.1.1c è stata eseguita una mappatura che dimostra, come da tematismo blu, la presenza di zolfo (S). Il processo di solfatazione ad opera dell'acido solforico della frazione carbonatica della roccia, è dovuto principalmente a emissioni antropiche di SO_2 .

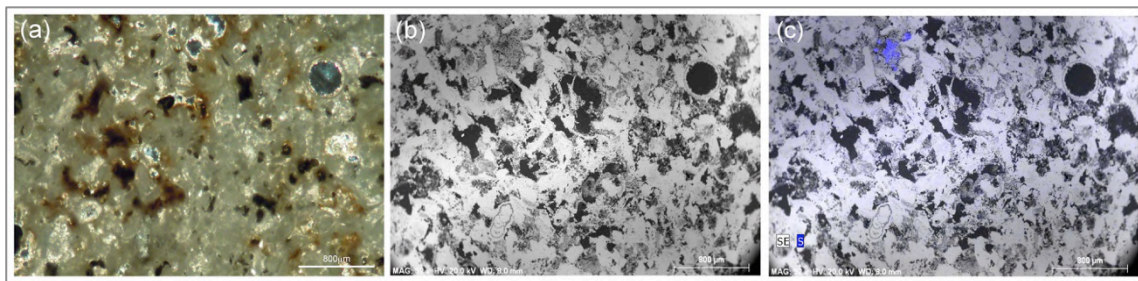


Figura 8.6.1.1: Analisi OM e SEM-EDS sul campione di pietra Cantone SS118. (a) fotografia in OM di una porzione di sezione sottile, (b) fotografia in SE di una porzione di sezione sottile, (c) mappatura del contenuto in zolfo (S) con tematismo di colore blu.

Nella pietra Forte, in sezione sottile, si nota la presenza di fasi minerali di dimensioni sino al millimetro non risolvibili al solo microscopio petrografico.

Le fasi minerali, mostrate in Fig. 8.6.1.2a, b, c, presentano un habitus dendritico con dimensioni che vanno da 250 a 500 μm . In particolare, l'area di sezione sottile osservata in OM di Fig. 8.6.1.2c è stata fotografata in elettroni secondari (SE) e sono state eseguite due analisi puntuali nei punti 1 e 2 sulle fasi minerali incognite (Fig. 8.6.1.2d).

I risultati delle due analisi mostrano una composizione chimica molto simile ricca in carbonio, calcio, ossigeno e manganese ad indicare una mineralogia formata da CaCO_3 (calcite) ed MnO_2

(pirolusite). Il carbonato di calcio, come specificato diverse volte, è il minerale principale di cui è costituita la roccia.

Il manganese nelle rocce carbonatiche, come riportato da Duchi & Vinci (1980), può essere associato alla frazione carbonatica e/o terrigena ed essere presente come sostituito isomorfogeno del Ca e del Mg, oppure sotto forma d'idrossidi (sia come pellicole di rivestimento su granuli carbonatici e non, sia come noduli), sotto forma di minerali propri (ossidi, solfuri, ecc.) come in questo caso.

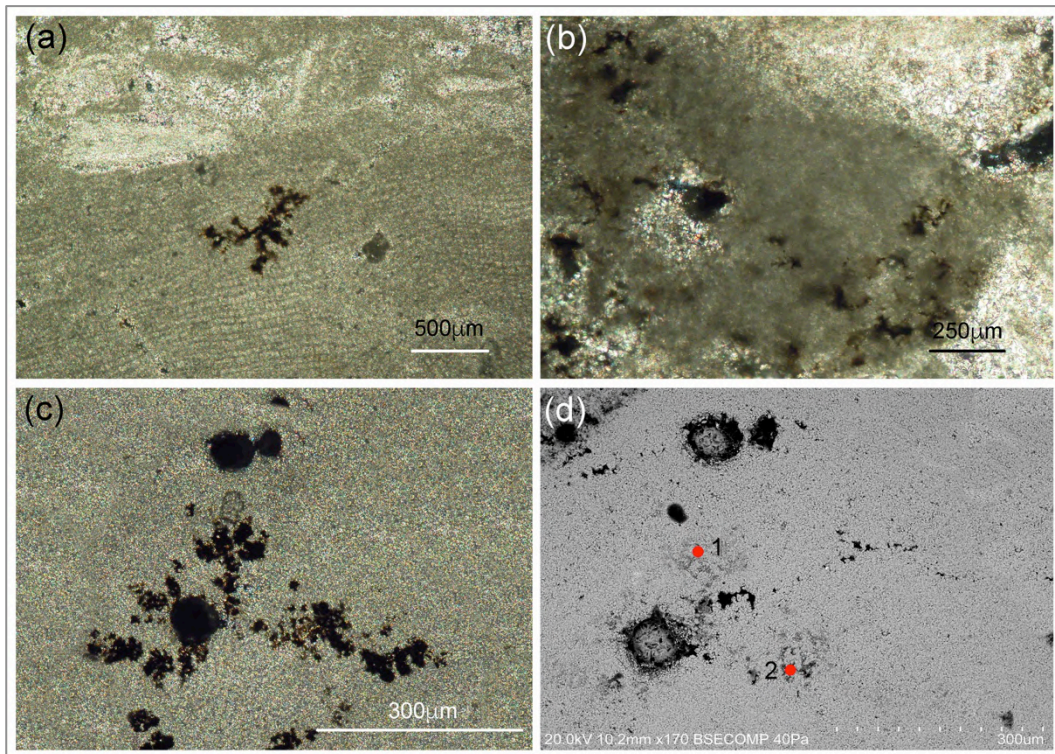


Figura 8.6.1.2: Analisi OM e SEM-EDS sul campione di pietra Forte SS41. (a,b,c) minerali di Pirolusite in sezione sottile, (d) punti di analisi EDS.

8.6.2 Malte

L'analisi in microscopia elettronica (SEM-EDS) eseguita sulle malte ha avuto essenzialmente lo scopo di verificare la presenza di bordi di reazione all'interfaccia legante-aggregato ed analizzare gli aspetti composizionali del legante all'interno della stessa malta, come rilevato nel campione SS38. In quest'ultimo, come già osservato macroscopicamente sulla base della differente colorazione, si rileva la presenza di due diverse tipologie di legante, così come confermato dalle analisi sulla sezione sottile eseguita nella zona di contatto. Il legante 1, sulla sinistra in sezione sottile, presenta una colorazione CIELAB 30*-5*15 tendente al brunastro ed è meno poroso rispetto al legante 2 (sulla destra).

Quest'ultimo mostra colori di birifrangenza più elevati in CIELAB 62*-2*49.

Nell'area d'interfaccia mostrata in Fig. 8.6.2.1 sono state eseguite due analisi puntuali, una per ogni tipologia di legante, che hanno dimostrato una differente composizione chimica.

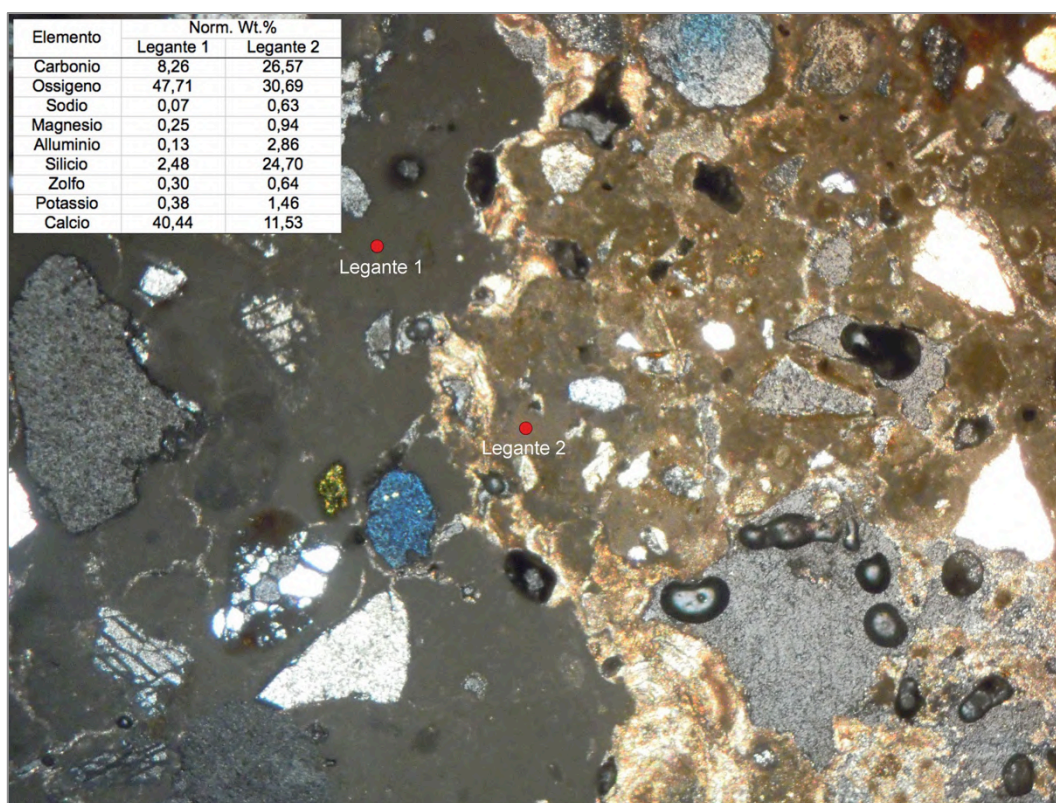


Figura 8.6.2.1: Interfaccia tra legante 1 e 2 nel calcestruzzo pavimentale Romanico SS38. I punti in rosso con tracciatura indicano dove è stata eseguita l'analisi puntuale con microsonda in EDS. I risultati dell'analisi sono riportati nella tabella in alto a sinistra.

Il legante 1 presenta contenuti di calcio e ossigeno $Ca = 40,44 \text{ Wt.}\%$, $O = 47,71 \text{ Wt.}\%$ e tenori relativamente bassi di $Si = 2,48 \text{ Wt.}\%$, $Al = 0,13 \text{ Wt.}\%$ e $C = 8,26 \text{ Wt.}\%$.

Il legante 2 mostra contenuti di calcio e ossigeno $Ca = 11,53 \text{ Wt.}\%$, $O = 30,69 \text{ Wt.}\%$ e tenori di silicio, alluminio e carbonio pari a $24,70 \text{ Wt.}\%$, $2,86 \text{ Wt.}\%$ e $26,57 \text{ Wt.}\%$.

Non è possibile risalire al tipo d'intervento di manodopera che ha comportato l'uso dei due leganti in una stessa malta, tuttavia potrebbe trattarsi di un probabile intervento di restauro. L'analisi puntuale evidenzia una diversa idraulicità delle due malte visibile dai diversi contenuti di silicio ed alluminio. Proprietà idrauliche differenti nelle malte di San Saturnino, come detto in precedenza, erano state già identificate in analisi TGA. Non si può escludere che la differente composizione dei due leganti derivi dall'uso di *facies* calcaree a diverso contenuto in argilla per la produzione delle malte, quali pietra Cantone e pietra Forte. È necessario, inoltre, precisare che nella serie stratigrafica dei calcari di Cagliari sono presenti *facies* calcaree (i.e., Tramezzario) con contenuti d'argilla intermedi tra la pietra Cantone e la pietra Forte. La pietra Tramezzario (non analizzata in questo lavoro), possiede un contenuto di argilla medio di poco inferiore a quello della pietra Cantone (Cuccuru et al. 2014).

Indagini sull'interazione legante-aggregato sono state eseguite sulla malta Romana di allettamento dei conci/laterizi SS100, dove sono stati osservati dei bordi di reazione che interessano alcuni litoclasti (Fig. 8.6.2.2a, b).

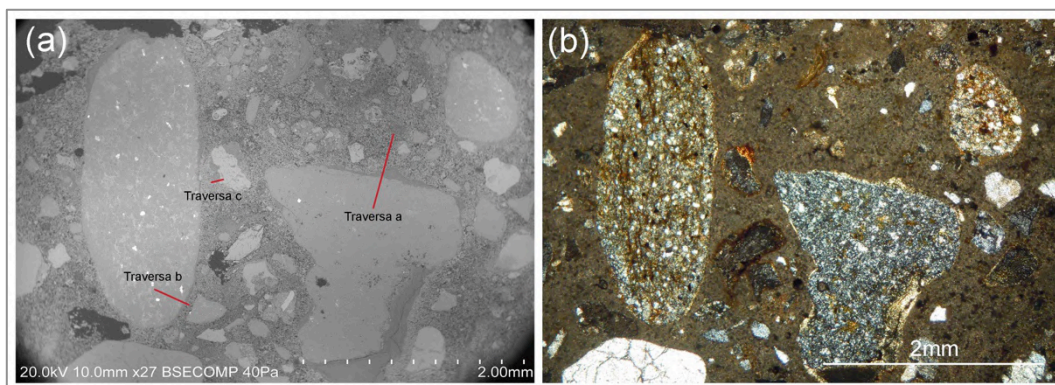


Figura 8.6.2.2: (a) litoclasti con bordi di reazione fotografati in SE, (b) gli stessi frammenti osservati in microscopia ottica.

L'immagine mostra una porzione di sezione sottile tramite elettroni secondari (SE; Fig. 8.6.2.2a), mentre in Fig. 8.6.2.2b la stessa area è osservata in OM mostrando la presenza di alcuni bordi di reazione all'interfaccia legante-aggregato. Sono state eseguite tre diverse analisi secondo direttrici trasversali al bordo di reazione (a, b, c) orientate in modo da posizionare un estremo nel legante e l'altro estremo all'interno del frammento di aggregato (Fig. 8.6.2.2a). Le tre analisi trasversali hanno il fine di verificare le variazioni di concentrazione di alcuni elementi chimici, quali Ca, Al, Si, O, e C, che costituiscono le fasi idrauliche C-A/S-H.

Nella direttrice trasversale a di Fig. 8.6.2.3 è interessante notare l'andamento della concentrazione del silicio. Sulla zona sinistra, in corrispondenza del nucleo dell'aggregato il Si ha una concentrazione relativamente alta ma altalenante, con conteggi variabili da 100 a 60 ed un picco

negativo intorno ai 40 point number, dovuto probabilmente alla presenza di fasi minerali non silicatiche all'interno del clasto.

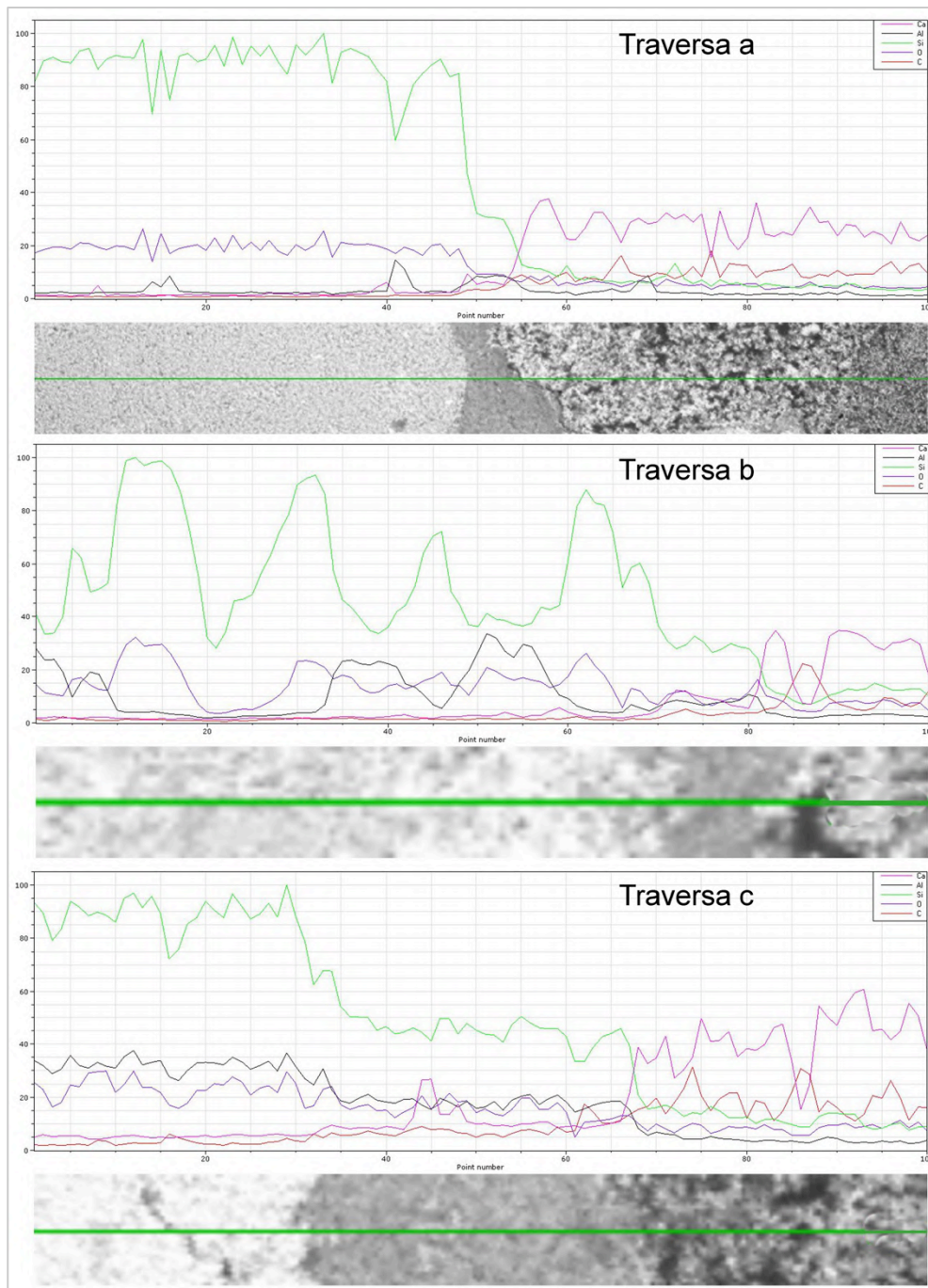


Figura 8.6.2.3: Analisi trasversali al bordo di reazione tra aggregato e legante eseguite in EDS .

In prossimità del bordo di reazione (50-55 point number), si ha una progressiva diminuzione del silicio che si attesta intorno ai 30 conteggi per poi diminuire bruscamente nell'area occupata dal legante carbonatico con conteggi medi intorno a 10.

Un andamento simile a quello del silicio è registrato nell'ossigeno, mentre concentrazioni simmetricamente opposte sono registrate nel calcio e del carbonio. Questi due elementi sono scarsamente abbondanti nel nucleo del clasto per poi aumentare con una media di 30 conteggi per il Ca e 10 conteggi per il C nella zona del legante carbonatico. Calcio e carbonio, all'interno del bordo di reazione, sembrano presentare una concentrazione intermedia tra quella dell'interno dell'aggregato e quella del legante attestandosi entrambi intorno ai 5-7 conteggi.

Nella direttrice trasversale b (Fig. 8.6.2.3), il bordo di reazione è leggermente più stretto rispetto alle direttrici a e c, come visibile da Fig. 8.6.2.2a, b. Anche in questo caso, come in precedenza, il silicio presenta all'interno del clasto dell'aggregato una concentrazione altalenante con picchi di 10, 30, 45 e 65 intervallati da zone a bassa concentrazione. Sul bordo di reazione legante-aggregato, anche in questo caso, il contenuto sembra diminuire rimanendo quasi costante nell'intervallo 70-80 point number, per poi diminuire ulteriormente passando sul legante carbonatico sulla zona sinistra dove le concentrazioni scendono a circa 10 conteggi di media. L'alluminio ha un comportamento simile con picchi localizzati all'interno del frammento di aggregato, uno in particolare fra 70 ed 80 point number. Per quanto riguarda il calcio, anche in questo caso, si nota un comportamento simile a quello rilevato nella direttrice a. La concentrazione di questo elemento è, infatti, estremamente bassa all'interno del clasto con un numero di conteggi < 5 per poi aumentare sulla media di 10 conteggi nel bordo di reazione, mentre è massima nella zona destra in prossimità della frazione legante. Gli altri elementi indagati sembrano non presentare particolare variabilità all'interno della direttrice.

Secondo la direttrice c di Fig. 8.6.2.3, gli elementi chimici analizzati presentano un andamento analogo alle precedenti direttrici evidenziando la presenza di un bordo di scambio chimico legante-aggregato dove la concentrazione degli elementi Ca, Al e Si risulta essere intermedia rispetto alla concentrazione degli stessi elementi nel nucleo del litoclasto e sul legante calcitico. Il trend di variazione degli elementi chimici nel bordo di reazione è analogo a quelli descritti da Crisci et al. (2004) e Moropoulou (2000) su frammenti di *Cocciopesto* e pozzolana i quali evidenziano come una diminuzione di Al ed Si ed un conseguente aumento del Ca sia dovuta ad un incremento dei volatili nelle fasi di neoformazione presenti nel bordo di reazione.

8.7 Analisi isotopiche sui marmi "bianchi" e "grigi"

Come illustrato nel paragrafo 8.1, i marmi bianchi campionati all'interno della Basilica di San Saturnino sono stati analizzati mediante microscopio petrografico (OM) al fine di identificare alcune caratteristiche distintive della roccia (Tab. 8.1.3.1).

Associata alla caratterizzazione OM, sui marmi bianchi e grigi è stata realizzata un'analisi degli isotopi $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ (Columbu et al. 2018c). Lo scopo della caratterizzazione isotopica è stato quello di stabilire, mediante confronto con un database relativo ai marmi dell'area Mediterranea (da Antonelli & Lazzarini 2015, Lazzarini et al. 1999), la provenienza (firma o tracciatura isotopica) di ogni marmo campionato.

In Tab. 8.7.1 sono riportati i dati petrografici significativi di ogni campione di marmo bianco sulla base della Tab. 8.1.3.1, con l'aggiunta dei valori relativi a $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$.

I dati relativi a $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ dei marmi bianchi sono stati inoltre plottati in due diagrammi distinti (Fig. 8.7.1a, b). Sulla base delle tracciature isotopiche e delle caratteristiche petrografiche [MGS dei cristalli di CaCO_3 (calcite) o $\text{Ca, Mg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomite)] sono state definite le provenienze dei marmi analizzati. Come mostrato in Fig. 8.7.1a, le tracciature isotopiche dei campioni SS16, SS17, SS20, SS51, SS70a ed SS112 ricadono in una area di incertezza occupata dai domini Carrara, Hymettus, Paros-1 e Göktepe (Turchia). Tuttavia, le caratteristiche petrografiche di Tab. 8.7.1, quali ad esempio $\text{MGS} < 2$ mm, struttura, tessitura, forme dei cristalli calcitici e fasi accessorie, discriminano i campioni SS16, SS17, SS20, SS51, SS70a ed SS112 come "Carrara" identificando quindi nelle cave apuane di Carrara una provenienza inequivocabile. Infatti, solo il marmo di Göktepe può a volte mostrare alcune caratteristiche petrografiche abbastanza simili a quelle descritte per la varietà Carrara, ma a differenza di questi ultimi non presenta fasi accessorie (Attanasio et al. 2015).

I campioni SS16, SS17, SS20, SS51, SS70a ed SS112 contengono invece minerali accessori per cui l'origine Turca può essere esclusa.

Per quanto riguarda i campioni SS34 ed SS35 con $\text{MGS} > 2$ mm, già durante l'osservazione in sezione sottile si ipotizzava una provenienza Greca.

Il campione SS34 è costituito da cristalli di calcite disposti a formare un mosaico eteroblastico (Tab. 8.7.1). Queste caratteristiche petrografiche corrispondono a quelle note per il marmo delle cave di Alikì nell'isola di Thasos (Thasos 1-2), per altro confermato dai anche i dati isotopici (Fig. 8.7.1b). Infine, il campione SS35, mostra un mosaico eteroblastico con cristalli di calcite a contorno tipicamente curvo e una firma isotopica che indica come probabile fonte di approvvigionamento le cave di Lakkoi nell'isola di Paros (Cicliadi, Paros-2).

Campione	Qtz	Ms	Gr	Ossidi di Ferro ed altri ossidi metallici	Pl	Ap	Dol	MGS (mm)	Bordo dei cristalli calcitici	Tessitura	Fabric	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	Probabile provenienza
SS16	±	±		±				0,42	Rettilineo, curvato	HO	Mosaico con alcuni punti tripli	1,35	-3,51	Carrara
SS17			±	±				0,80	Curvato ± rettilineo	HO/HE	Mosaico	2,21	-2,38	Carrara
SS20	±	+	±	+(He, Py)	±			0,45	Rettilineo, curvato	HO	Mosaico con alcuni punti tripli	2,32	-2,43	Carrara
SS34	+	+ / +++	±	++ (Py)				2,55	Suturato	HE	Mosaico con cristalli allungati	3,68	-0,88	Thasos Aliko
SS35		±	++			±		2,75	Curvato	HE	Mosaico	1,68	-2,57	Paros Lakkoi (Paros-2)
SS51	+++		±	± (Py)				1,05	Curvato ± rettilineo	HO/HE	Mosaico leggermente foliato	1,95	-1,02	Carrara
SS70a	+	±		+(He, Py)				0,70	Curvato, convesso	HE	Mosaico con frammenti fini	2,06	-1,93	Carrara
SS112	+	±	±	+(He, Py, Mag)	++		±	0,65	Rettilineo ± curvato	HO	Poligonale (con punti tripli)	2,59	-1,63	Carrara

Tabella 8.7.1: Caratteristiche petrografiche e isotopiche dei marmi bianchi di San Saturnino: Qtz = quarzo, Ms = muscovite, Gr = granato, He = ematite, Py = pirite, Mag = magnetite, Pl = plagioclasio, Ap = apatite, Chl = clorite, Dol = dolomite. MGS = Maximum Grain Size dei cristalli di CaCO_3 o $\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2$, HO = oloblastica, HE = eteroblastica (da Columbu et al. 2018c).

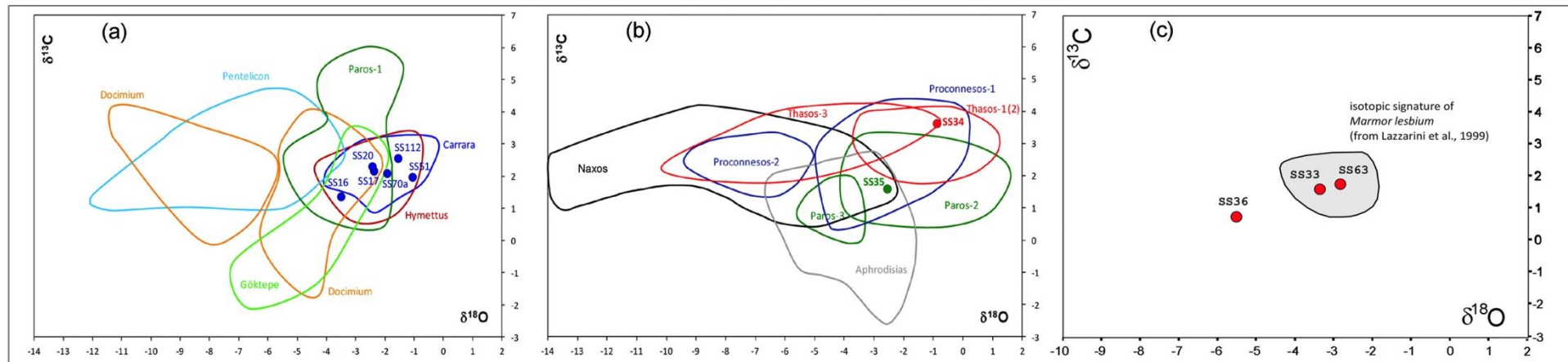


Figura 8.7.1: Tracciate isotopiche dei marmi della Basilica di San Saturnino: (a) marmi bianchi con MGS < 2 mm, (b) marmi bianchi con MGS > 2 mm, (c) marmi bigi. (Da Columbu et al. 2018c).

Le provenienze dei marmi di Carrara concordano con i dati preliminari di Grillo & Prochaska (2014).

La provenienza dei marmi grigi SS33, SS36 ed SS63 era stata già stata identificata macroscopicamente ed in sezione sottile (Paragrafo 8.1), come isola di Lesbo (Grecia).

La tracciatura isotopica di Fig. 8.7.1c per i marmi grigi, conferma l'ipotesi Lesbo solo per i campioni SS33 ed SS63 ricadenti all'interno del relativo dominio di marmi "bigi".

Per quanto riguarda il campione SS36 (Fig. 8.7.1c), nonostante le sue caratteristiche macroscopiche e petrografiche siano molto simili a quelle del *Marmor Lesbium bigio*, l'analisi isotopica non ha fornito conferme dal momento che la roccia non rientra nel dominio definito da Lazzarini et al. (1999).

Lo stesso database di riferimento contiene anche alcuni campioni che ricadono al di fuori del dominio isotopico principale probabilmente perché i valori degli isotopi sono stati inficiati da alterazioni idrotermali. Di conseguenza, una possibile origine da Lesbo non può essere completamente esclusa per SS36. Litotipi con caratteristiche macroscopiche e microscopiche abbastanza simili a quelle di SS36 affiorano anche nella zona del Monte Lapanu (Sardegna Sud Occidentale), in *facies* relative della formazione metacalcareo-dolomitica di Gonnese (Cambriano Inferiore). In particolare, notizie sullo sfruttamento di questo litotipo nell'area del Monte Lapanu in periodo Romano sono note già dagli anni 80 (Vannelli 2001).

A Monte Lapanu, la coltivazione è documentata anche in epoca contemporanea sino all'abbandono delle cave (avvenuto dopo il fallimento dell'azienda estrattrice), oggi inglobate all'interno del poligono militare di Teulada a partire dal 1956.

Ulteriori indagini circa la provenienza di SS36 non sono state possibili dal momento che l'Esercito Militare Italiano in stanza a Capo Teulada non ha concesso l'autorizzazione al prelievo di campioni.

Il lastricato del *Cardo* e le Terme II di Tharros: risultati e discussioni

9.1 Caratteristiche petrografiche (OM)

Il lastricato del *Cardo* di Tharros è realizzato con grossi conci di vulcanite di superficie sino a 2 m². Il *Cardo* presenta, su alcuni tratti di percorso, sponde laterali realizzate anch'esse in vulcanite ed alcune volte in arenaria del periodo Tirreniano.

9.1.1 Rocce (arenarie e vulcaniti)

Le arenarie tirreniane presentano una colorazione abbastanza uniforme di tonalità tendenti al beige (CIELAB 70*-3*30) o al giallastro chiaro (CIELAB 39*3*19, Fig. 9.1.1.1a, b).

In sezione sottile, la roccia presenta le caratteristiche di un deposito arenaceo a cemento carbonatico microspartito (Fig. 9.1.1.2a, b). La granulometria è classata per cristallo-clasti di quarzo, feldspati, miche, pirosseni ed olivine con diametri mediamente intorno a 500 µm. La roccia contiene una ricca associazione fossilifera rappresentata da celenterati, cirripedi, alghe, lamellibranchi e gasteropodi.

La scarsa presenza della componente argillosa e la struttura grano-sostenuta della roccia indica che si tratta di “grainstone” secondo la classificazione di Dunham (1962).

Come già accennato nel Capitolo 3, tale arenaria, ampiamente utilizzata a Tharros, proviene da affioramenti locali.

Le aree estrattive più prossime al sito sono localizzate a Capo San Marco ed in località *Sa Perda e S'Altare* dove, probabilmente, erano localizzate le banchine portuali fenicio-puniche (Del Vais et al. 2014).

Le vulcaniti campionate negli affioramenti dell'area del Sinis e nel lastricato del *Cardo* sono rappresentate prevalentemente da due *facies*, una di tipo massivo ed un'altra di tipo vescicolato (bolloso) con colorazioni spesso grigio-nerastre in CIELAB 37*-2*6 (Fig. 9.1.1.1c, d, e, f). Alcune altre *facies* presentano invece colorazioni di tonalità bordeaux in spazio colore CIELAB 51*1*7 (Fig. 9.1.1.1g, h). Nelle vulcaniti, i processi di alterazione sono praticamente assenti o rappresentati da limitate patine di tipo biologico.

In Tab. 9.1.1.1 sono riportate le caratteristiche petrografiche delle vulcaniti prelevate dal lastricato del *Cardo* e quelle prelevate dagli affioramenti interni al sito dove erano state identificate probabili tracce di estrazione.

In sezione sottile, mediante diagrammazione QAPF, le rocce possono essere classificate come

basalti ed andesiti. Alcuni fra i campioni analizzati sembrano presentare composizioni più evolute. In tutti i campioni, le strutture sono di tipo porfirico (con seguenti indici di porfiricità: $15 < I.P. < 45\%$; Tab. 9.1.1.1) per fenocristalli principalmente di plagioclasti (con dimensioni < 1 mm fino a $1,5$ mm) a composizione andesinica e labradoritica (Fig. 9.1.1.2c, d, e, f, g, h).

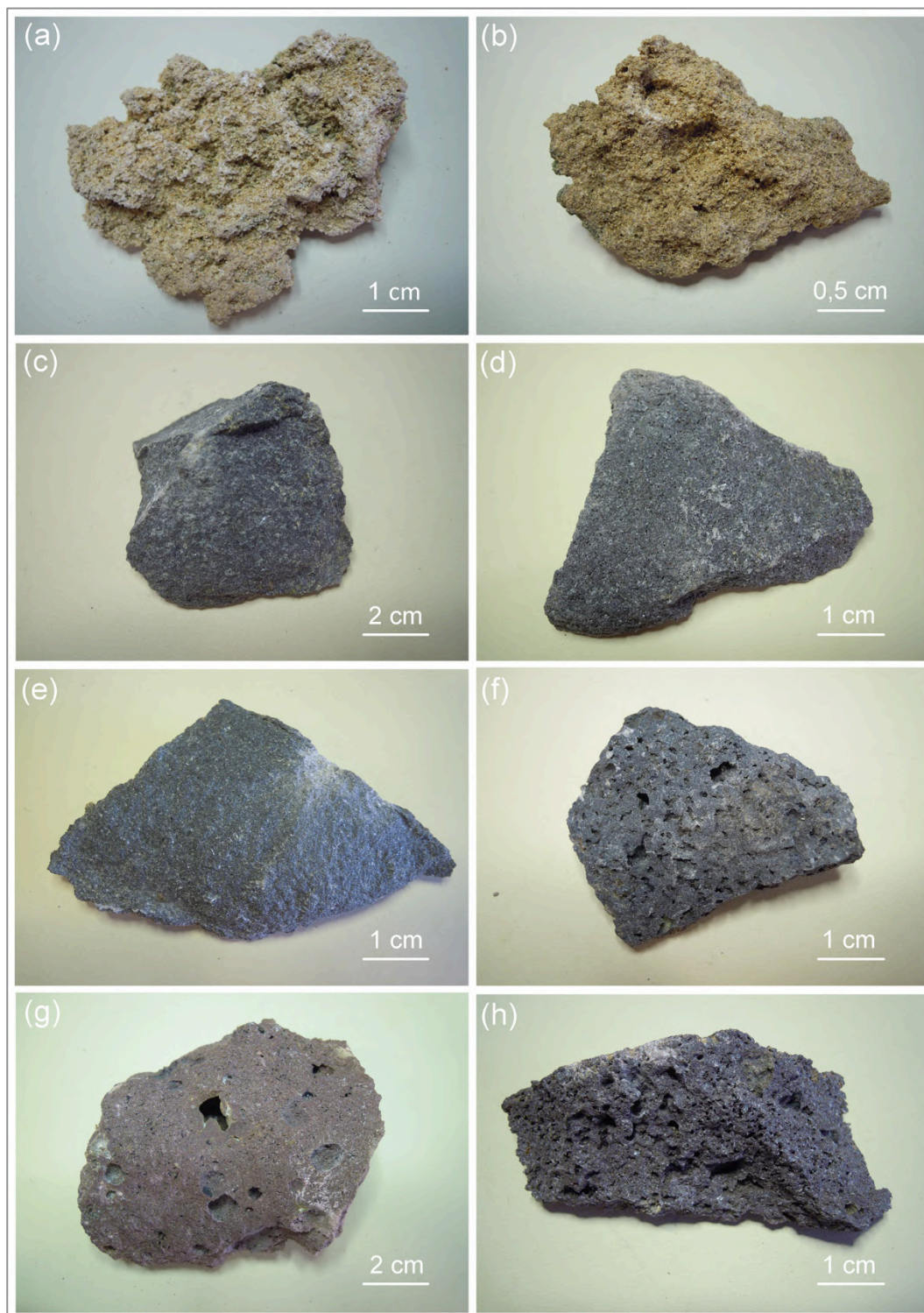


Figura 9.1.1.1: Caratteristiche macroscopiche delle rocce di Tharros: (a) arenaria TH10, (b) arenaria TH2, (c) vulcanite di affioramento THc7, (d) vulcanite di affioramento THc6, (e) vulcanite TH11, (f) vulcanite TH3, (g) vulcanite TH12, (h) vulcanite TH50.

Abbondanti risultano le olivine sempre alterate in iddingsite (Fig. 9.1.1.2f). Le dimensioni sono da sub-millimetriche a massimo 1 mm.

I pirosseni monoclini sono frequenti con habitus solitamente anedrale e dimensioni sempre minori del millimetro (Fig. 9.1.1.2c). Tra i minerali opachi si distinguono ilmeniti e magnetiti. La pasta di fondo è ipocristallina con tessitura in genere poco orientata, di tipo intersertale. Locali e deboli iso-orientazioni dei cristalli di plagioclasio conferiscono una tessitura pilotassitica nei campioni TH13 e TH44.

Campione	Provenienza	Caratteristiche petrografiche			
		Struttura	Indice di porfiricità (I.P.%)	Fenocristalli	Tessitura
TH1			20-25	Pl, Ol, Cpx, Op (Mt)	Intersertale
TH3			20-25	Pl, Ol, Cpx, Op (Mt)	Intersertale
TH4			25-30	Pl, Ol, Cpx, Op (Ilm, Mt)	Intersertale
TH5			20-25	Pl, Ol, Cpx, Op (Ilm, Mt)	Intersertale
TH11			20-25	Pl, Ol, Op (Mt, Ilm), Cpx	Intersertale
TH12			25-30	Pl, Ol, Op (Ilm, Mt), Cpx	Intersertale
TH13			15-20	Pl, Ol, Op (Mt), Cpx	Pilotassitica
TH42			25-30	Pl, Ol, Op (Ilm, Mt), Cpx	Intersertale
TH43	Lastricato del <i>Cardo</i>	Porfirica	25-30	Pl, Ol, Op (Ilm, Mt), Cpx	Intersertale
TH44			35-45	Pl, Ol, Op (Mt)	Pilotassitica
TH45			25-30	Pl, Ol, Cpx, Op (Ilm, Mt)	Intersertale
TH46			25-30	Pl, Ol, Cpx, Op (Ilm, Mt)	Intersertale
TH47			20-25	Pl, Ol, Op (Mt, Ilm)	Intersertale
TH48			20-25	Pl, Ol, Cpx, Op (Mt, Ilm)	Intersertale
TH49			20-25	Pl, Ol, Op (Ilm, Mt), Cpx, Cal	Intersertale
TH50			20-25	Pl, Ol, Op (Mt, Ilm)	Intersertale
TH51			20-25	Pl, Ol, Op (Mt, Ilm), Cpx	Intersertale
THc6	Affioramento	Porfirica	20-25	Pl, Ol, Cpx, Op (Ilm, Mt)	Intersertale
THc7			20-25	Pl, Ol, Cpx, Op (Ilm, Mt)	Intersertale

Tabella 9.1.1.1 Caratteristiche petrografiche delle vulcaniti di Tharros. Pl = plagioclasio Ol = olivina, Cpx = clinopirosseno, Op = opaco, Ilm = ilmenite, Mt = magnetite, Cal = calcite. I minerali sono posti in ordine di abbondanza.

Al fine di verificare se gli affioramenti interni al sito fossero stati utilizzati come punti di approvvigionamento per la realizzazione del lastricato del *Cardo*, i campioni di cava THc6 e THc7 sono stati confrontati in sezione sottile con i campioni di monumento. Sulla base delle osservazioni in sezione sottile non si rilevano affinità tra campioni poiché le caratteristiche petrografiche essenziali (e.g., dimensioni dei fenocristalli, il loro habitus e la loro percentuale) sono, anche se di poco, diverse. Sono tuttora in corso dei confronti incrociati fra i campioni del *Cardo* e quelli di affioramenti anche esterni all'area archeologica sulla base di analisi chimiche ed osservazione in sezione sottile, come già avvenuto in alcuni casi studio di monumenti della Sardegna (Columbu et al. 2019b, Columbu et al. 2018b).

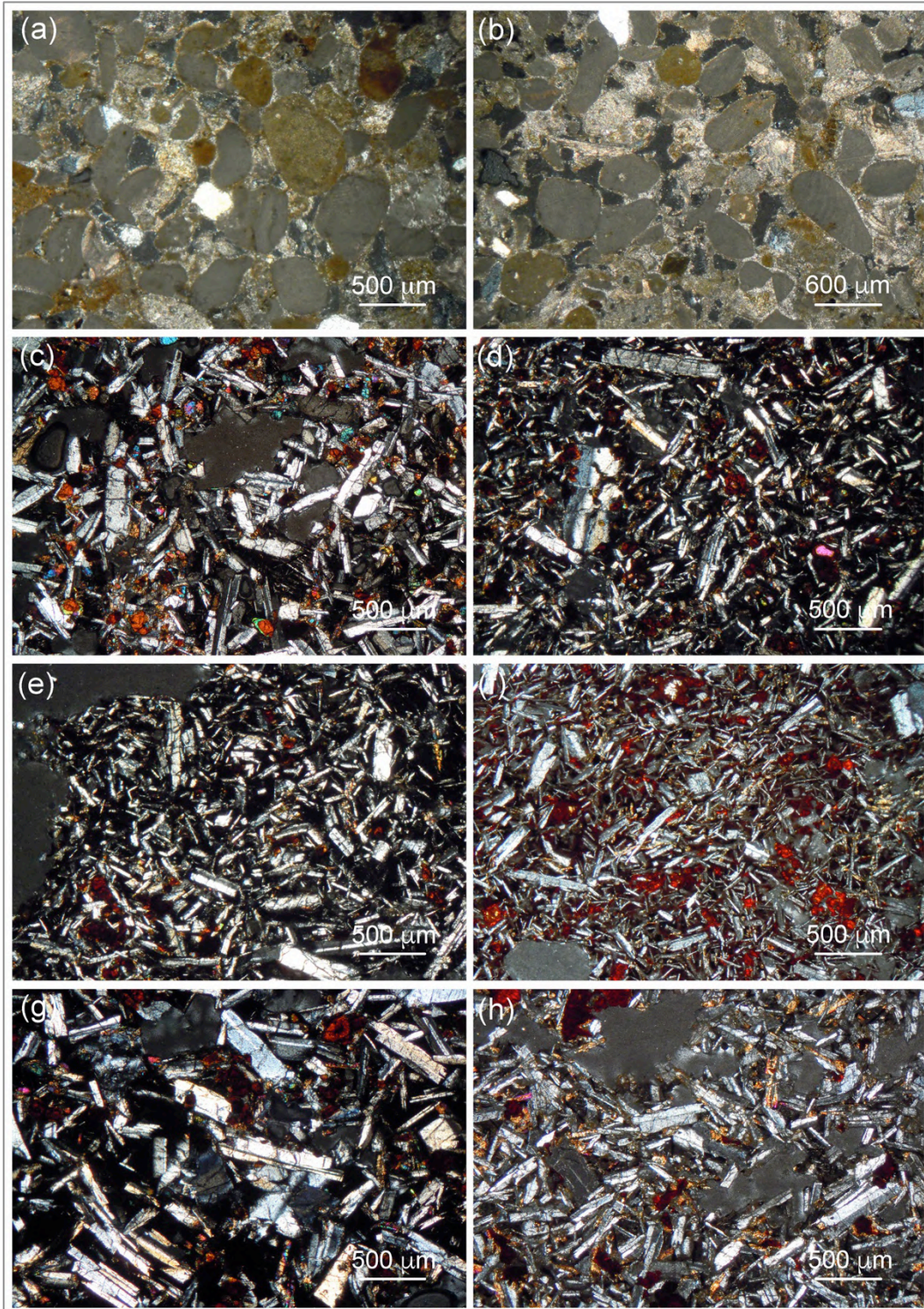


Figura 9.1.1.2: Caratteristiche microscopiche delle pietre di Tharros: (a) arenaria TH10, (b) arenaria TH2, (c) cristalli submillimetrici di pirosseno monoclinico in THc7, (d) tessitura intersertale in THc6, (e) tessitura intersertale in TH11, (f) olivina iddingsitizzata in TH13, (g) plagioclasti labradoritici (TH12), (h) facies basaltica bollosa a tessitura intersertale (TH50).

9.1.2 Malte

Le malte prelevate dalle Terme II di Tharros, presentano macroscopicamente una colorazione variabile da biancastro chiaro a grigiastro in spazi colore CIELAB 79*-5*2 e 62*0*-1 (Fig. 9.1.2.1a, b, e, f, g, h).

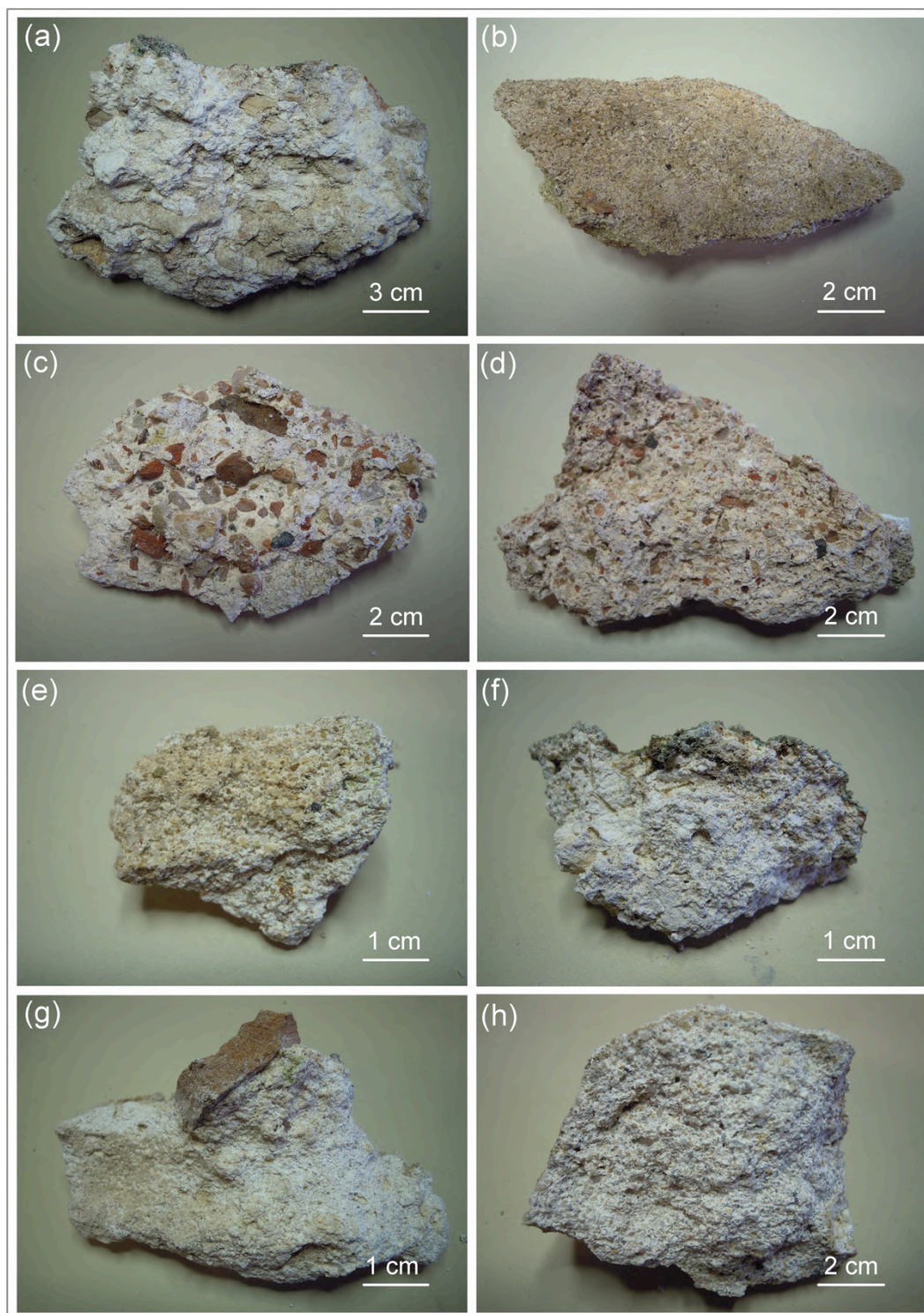


Figura 9.1.2.1: Caratteristiche macroscopiche delle malte delle Terme II: (a) calcestruzzo pavimentale TH36, (b) malta di allettamento dei conci/laterizi TH25, (c) *Trullissatio* TH32, (d) *Trullissatio* TH30, (e) arriccio TH38a, (f) intonachino TH40b, (g) calcestruzzo delle volte TH26, (h) calcestruzzo delle volte TH27.

In alcuni campioni, gli aggregati di *Cocciopesto* finemente macinati (< 63 µm) e dispersi nel legante conferiscono una colorazione rossiccia-arancio in CIELAB 59*11*22 (Fig. 9.1.2.1c, d).

In sezione sottile, le malte presentano un legante calcitico caratterizzato dalla presenza di grumi (2 al 8% vol.) di legante (originaria calce) non ben amalgamato durante la preparazione dell'impasto.

Malta	Funzione	Litoclasti	<i>Cocciopesto</i>	Bioclasti	Cristallo-clasti sialici	Cristallo-clasti mafici	
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
TH33	Calcestruzzo pavimentale	0,7	81,0	1,5	16,8	0	
TH34		2,4	81,7	2,4	12,9	0,6	
TH35		0,3	85,2	2,3	11	1,2	
TH36		1,2	86,3	1,4	10,9	0,2	
TH37		1,6	88,4	1,6	8,1	0,3	
TH14	Allettamento conci/laterizi	0,3	0,0	12,4	86,1	1,2	
TH20		1,3	0,0	13,9	84,5	0,3	
TH21		0,7	0,0	12,8	86	0,5	
TH22		3,8	0,0	8,8	87,4	0	
TH23		2,1	0,0	13,5	84,3	0,1	
TH24		0,5	0,0	13,2	86,2	0,1	
TH25		0,5	0,0	15,4	83,3	0,8	
TH15p		<i>Trullissatio</i>	2,7	60,3	0,7	36,3	0
TH16p	1,3		71,9	1,3	24,6	0,9	
TH17p	1,7		81,7	1,8	14,8	0	
TH28	3,6		73,8	2,2	19,3	1,1	
TH29	1,0		32,6	1,3	64,9	0,2	
TH30	1,1		77,7	1,6	19,1	0,5	
TH31	2,4		65,2	1,9	29	1,5	
TH32	1,9		70,8	1,2	25,3	0,8	
TH8	Arriccio		0,1	0,0	11,5	88,4	0
TH38a			1,7	0,0	10,8	87,3	0,2
TH39a		0,9	0,0	11,5	87,5	0,1	
TH40a		0,3	0,0	13,9	85,4	0,4	
TH9	Intonachino	94,7	0,0	0,0	5,2	0,1	
TH38b		95,1	0,0	0,0	4,2	0,7	
TH39b		93,9	0,0	0,0	5,6	0,5	
TH40b		96,3	0,0	0,0	3,4	0,3	
TH26	Calcestruzzo volte	4,7	0,0	16,0	78,9	0,4	
TH27		4,9	0,0	14,4	80,7	0	

Tabella 9.1.2.1: Analisi modale degli aggregati presenti nelle malte delle Terme II espressi in percentuale sul totale dell'aggregato.

In tutte le malte, ad esclusione degli intonachini, l'aggregato è composto da frammenti di litoclasti non ben identificabili (e.g., ciottoli, circa 80%), ossidiana (circa 8%) e lidite (circa 2%). Negli intonachini, l'aggregato di litoclasti consiste invece di frammenti di roccia calcarea (95%) e ciottoli (5%). Alcuni gruppi di malta presentano aggregato di *Cocciopesto*. In tutti i gruppi sono presenti cristallo-clasti, rappresentati per circa il 98% da fasi sialiche (e.g., quarzo, rari K-feldspato, plagioclasti) e 2% da fasi mafiche (e.g., clinopirosseno, biotite, opachi).

Nei calcestruzzi pavimentali l'aggregato è in prevalenza composto da *Cocciopesto* (84,5%) di dimensioni da < 1 mm sino a 2,5 cm con circolarità $3 < C < 4$. Sono inoltre molto abbondanti i

cristallo-clasti sialici (12,4%), con dimensioni da 0,5 a 3 mm e circolarità elevate ($C > 0,6$, Fig. 9.1.2.2a). I litoclasti sono presenti in percentuali medie di 1,2%, con $6 < C < 7$. I bioclasti sono rappresentati da foraminiferi, briozoi, bivalvi ed alghe coralline.

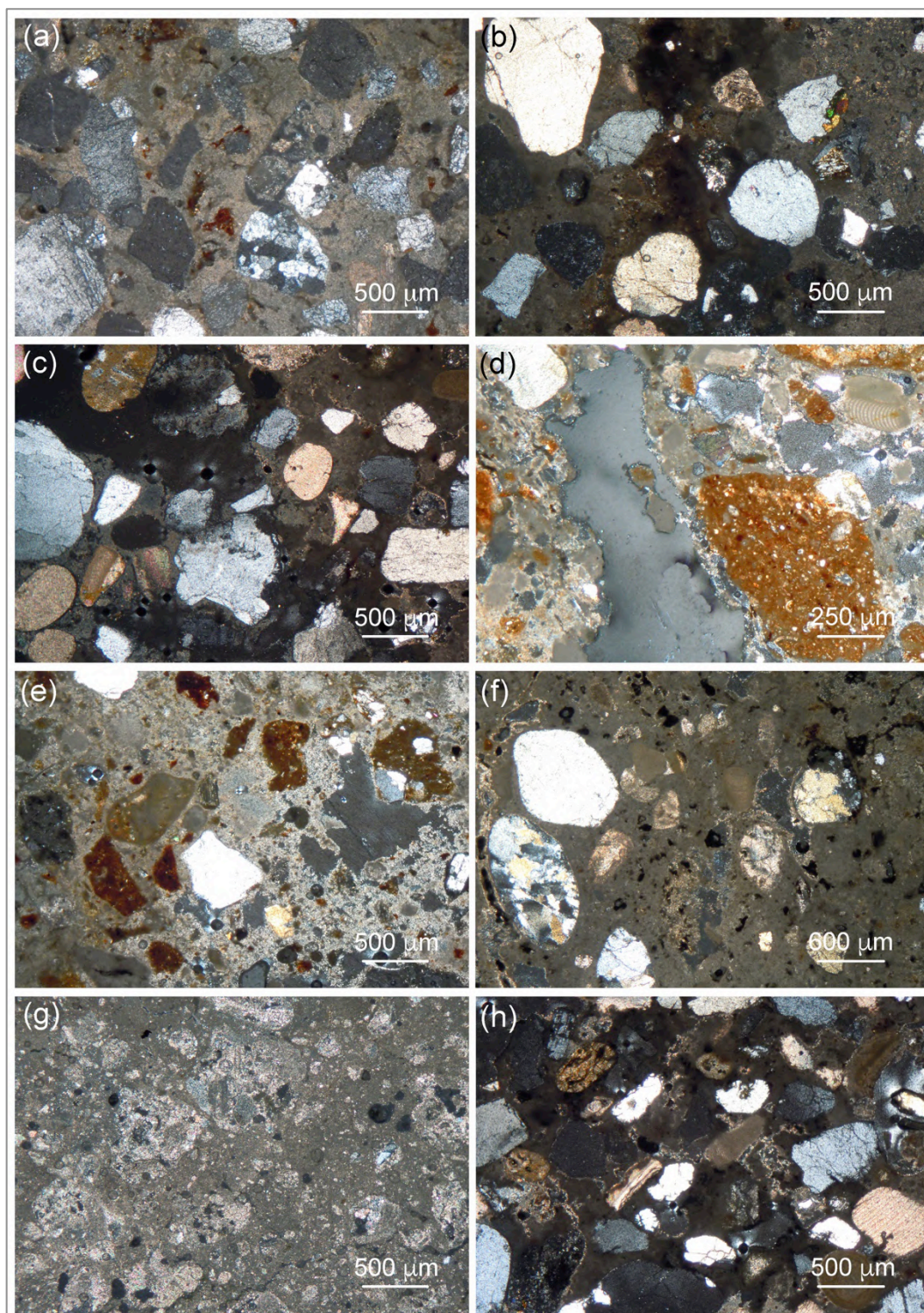


Figura 9.1.2.2: Caratteristiche microscopiche delle malte di Tharros: (a) cristallo-clasti sialici nel calcestruzzo pavimentale TH34, (b) cristallo-clasti sialici nella malta di allettamento dei conci/laterizi TH21, (c) bioclasti in TH22, (d) *Cocciopesto* nel *Trullissatio* TH31, (e) *Cocciopesto* nel *Trullissatio* TH29, (f) litoclasti nell'arriccio TH8, (g) intonachino TH38b composto da aggregato calcareo, (h) calcestruzzo delle volte TH26.

Nelle malte di allettamento di conci/laterizi il *Cocciopesto* è assente ed i litoclasti sono presenti con percentuali da 0,3 a 3,8% con una media di 1,3%. In questo gruppo di malte un'ampia percentuale di aggregato (85,8%) consiste di cristallo-clasti ialici di dimensioni da < 1 mm a 1,5 mm (Fig. 9.1.2.2b). La circolarità degli elementi è anche in questo caso elevata con $6 < C < 7$.

Abbondante anche la frazione fossilifera con percentuali da 8,8 a 15,4% con media di 12,9%, rappresentata da bioclasti con dimensioni mai superiori ad 1 mm (Fig. 9.1.2.2c).

Nel gruppo dei *Trullissatio*, gli aggregati sono rappresentati per il 66,8% da *Cocciopesto* a spigoli vivi ($C < 0,3$) e dimensioni da < 1 mm sino a 1,5 cm (Fig. 9.1.2.2d, e).

In ordine di abbondanza sono presenti anche cristallo-clasti in un intervallo da 14,8 a 65,1 con una media del 29,8%. Le dimensioni vanno da < 1 mm a 0,8 mm con circolarità elevate ($C > 7$). I litoclasti sono presenti in un intervallo da 1 a 3,6% con media del 2%, mentre la presenza di bioclasti è attestata in un intervallo da 0,7 a 2,2% con media di 1,5%.

Nel gruppo degli arricci, il *Cocciopesto* è assente ed i litoclasti sono presenti in esigue percentuali (0,7%, Fig. 9.1.2.2f). Negli arricci sono presenti bioclasti (e.g., foraminiferi, briozoi, bivalvi ed alghe coralline) con percentuali medie di 11,9%. Tale valore, piuttosto elevato, è simile a quello riscontrato nelle malte di allettamento dei conci/laterizi e nei calcestruzzi delle volte, mentre nei restanti gruppi le percentuali medie di componente bioclastica sono nettamente inferiori. Negli arricci la maggior parte dell'aggregato consiste di cristallo-clasti con dimensioni prevalentemente sub-millimetriche.

Il gruppo degli intonachini presenta un aggregato molto fine rappresentato principalmente da litoclasti calcarei e subordinatamente da cristallo-clasti con dimensioni sempre inferiori a 200 μm e circolarità di $6 < C < 7$ (Fig. 9.1.2.2g).

I calcestruzzi delle volte (Fig. 9.1.2.2h) presentano anch'essi un aggregato principalmente rappresentato da cristallo-clasti ialici (circa l'80%), litoclasti (circa 5%) e bioclasti (circa 15%), sempre rappresentati da foraminiferi, briozoi, bivalvi ed alghe coralline.

Le materie prime utilizzate nelle malte, come spesso accade nelle costruzioni Romane, provengono da aree in vicinanza del sito. Nello specifico caso di Tharros, la materia prima calcarea per la produzione del legante delle malte potrebbe provenire da zone adiacenti al sito. Come riportato in Fig. 3.3.1, Capitolo 3, l'area del Sinis presenta estesi affioramenti di roccia calcarea (tematismo 8) relativi a depositi marini del terzo ciclo sedimentario miocenico.

Tuttavia, la provenienza della materia prima calcarea rimane al momento ignota poiché non sono stati trovati frammenti "fantasmi" (frammenti della pietra da calce originaria) nella malta, ed anche perché negli affioramenti di calcare locali non sono visibili tracce di estrazione.

L'aggregato di cristallo-clasti quarzoso-feldspatici con tutta probabilità proviene dalle vicine spiagge di S. Giovanni del Sinis, Funtana Meiga, Arutas e Mari Ermi. A confermarlo sono le

analogie di alcuni caratteri composizionali mineralogia, granulometria, circolarità e componente bioclastica tra il materiale sabbioso di questi arenili e quello osservato in sezione sottile.

A conferma del prelievo di aggregati dai banchi litorali, ci sarebbe inoltre la presenza nelle malte di bioclasti di alghe coralline, tipici di ambiente marino. L'ossidiana, presente come litoclasto, potrebbe provenire da affioramenti situati sul Monte Arci distante circa 26 Km in direzione SE. L'utilizzo dell'ossidiana di Monte Arci in epoca Romana come aggregato pozzolanico è stato già documentato da Columbu & Garau (2017) e Columbu et al. (2019c) nelle malte del Teatro di Nora (Pula).

9.2 Proprietà fisico-meccaniche delle rocce

Come si osserva in Tab. 9.2.1 e Fig. 9.2.1, le arenarie e le vulcaniti dell'area di Tharros presentano caratteristiche fisico-meccaniche molto differenti. Ciò è ben visibile dai grafici di Fig. 9.2.1, in cui le popolazioni di arenaria e vulcanite appaiono sempre ben distinte e distanti fra loro.

La differenza sostanziale tra i due litotipi è in primis la porosità totale di $39, \pm 2,85\%$ per le arenarie e $18,6 \pm 3,96\%$ per le vulcaniti (Tab. 9.2.1, Fig. 9.2.1f).

Tale fattore, insieme alla scarsa resistenza meccanica delle arenarie di $0,25 \pm 0,05$ MPa vs $8,82 \pm 2,37$ MPa delle vulcaniti (Tab. 9.2.3), favorisce sul monumento il fenomeno dell'erosione differenziale sebbene l'accostamento tra le due litologie sia piuttosto raro poiché venivano usate per la costruzione di elementi architettonici differenti.

In Fig. 9.2.1e, le arenarie presentano una tendenza lineare con coefficiente di correlazione elevato ($R^2 = 0,94$), dovuto soprattutto al basso numero di campioni, diversamente dalle vulcaniti in cui le elevate dispersioni di ρ_B ed I_{S50} conferiscono un coefficiente di correlazione al gruppo $R^2 = 0,01$.

I campioni di entrambi i gruppi sono correlati da una funzione esponenziale con $R^2 = 0,82$. In Fig. 9.2.1f è evidenziato come la resistenza meccanica a punzonamento di arenarie e vulcaniti sia correlata con la porosità totale da un coefficiente di correlazione $R^2 = 0,79$.

La correlazione con la porosità totale è molto alta nelle arenarie con $R^2 = 0,89$ mentre risulta particolarmente bassa nelle vulcaniti dove $R^2 = 0,05$.

Per quanto riguarda i coefficienti d'imbibizione dei due litotipi, si notano ancora una volta differenze sostanziali dove: CI_w medio delle arenarie è pari a $17,3 \pm 2,92\%$ mentre nelle vulcaniti $CI_w = 4,7 \pm 1,73$ (Tab. 9.2.1). Le arenarie, a causa della loro porosità più elevata hanno più capacità di assorbire acqua ed essere di conseguenza esposte a più intensi fenomeni di alterazione e degradazione.

La prova di assorbimento per immersione totale visibile in Tab. 9.2.2 e Fig. 9.2.1g, h, mostra come la saturazione delle arenarie sia mediamente più lenta rispetto alle vulcaniti richiedendo 10 giorni di test. Le vulcaniti raggiungono una saturazione completa già dopo 7 giorni di prova.

La Fig. 9.2.1c mostra come gli indici di saturazione sempre siano sempre $< 100\%$ in entrambi i litotipi e che ancora una volta differenziano i due gruppi in maniera significativa. Si nota infatti come S.I. = $84,7 \pm 4,91\%$ nelle arenarie e S.I. = $67,2 \pm 10,35\%$ nelle vulcaniti.

Le densità dei due litotipi visibili in Tab. 9.2.1 e Fig. 9.2.1a, b, d sono per le arenarie tirreniane: $\rho_R = 2,68 \pm 0,02$ g/cm³, $\rho_B = 1,74 \pm 0,08$ g/cm³ e $\rho_S = 2,82 \pm 0,06$ g/cm³.

Tali densità dipendono dalla paragenesi della roccia, composta principalmente da bioclasti, quarzo, pirosseni, miche, olivine e cemento carbonatico. Nei basalti, le densità sono le seguenti: $\rho_R = 2,80 \pm$

0,05 g/cm³, $\rho_B = 2,35 \pm 0,10$ g/cm³ e $\rho_S = 2,87 \pm 0,06$ g/cm³ e dipendono dalla paragenesi della roccia che consiste in alcune fasi minerali ad alta densità quali ad esempio olivina ($\rho_S = 4,39$ g/cm³), clinopirosseno ($\rho_S = 3,4$ g/cm³), magnetite ($\rho_S = 5,15$ g/cm³), ed ilmenite ($\rho_S = 4,72$ g/cm³).

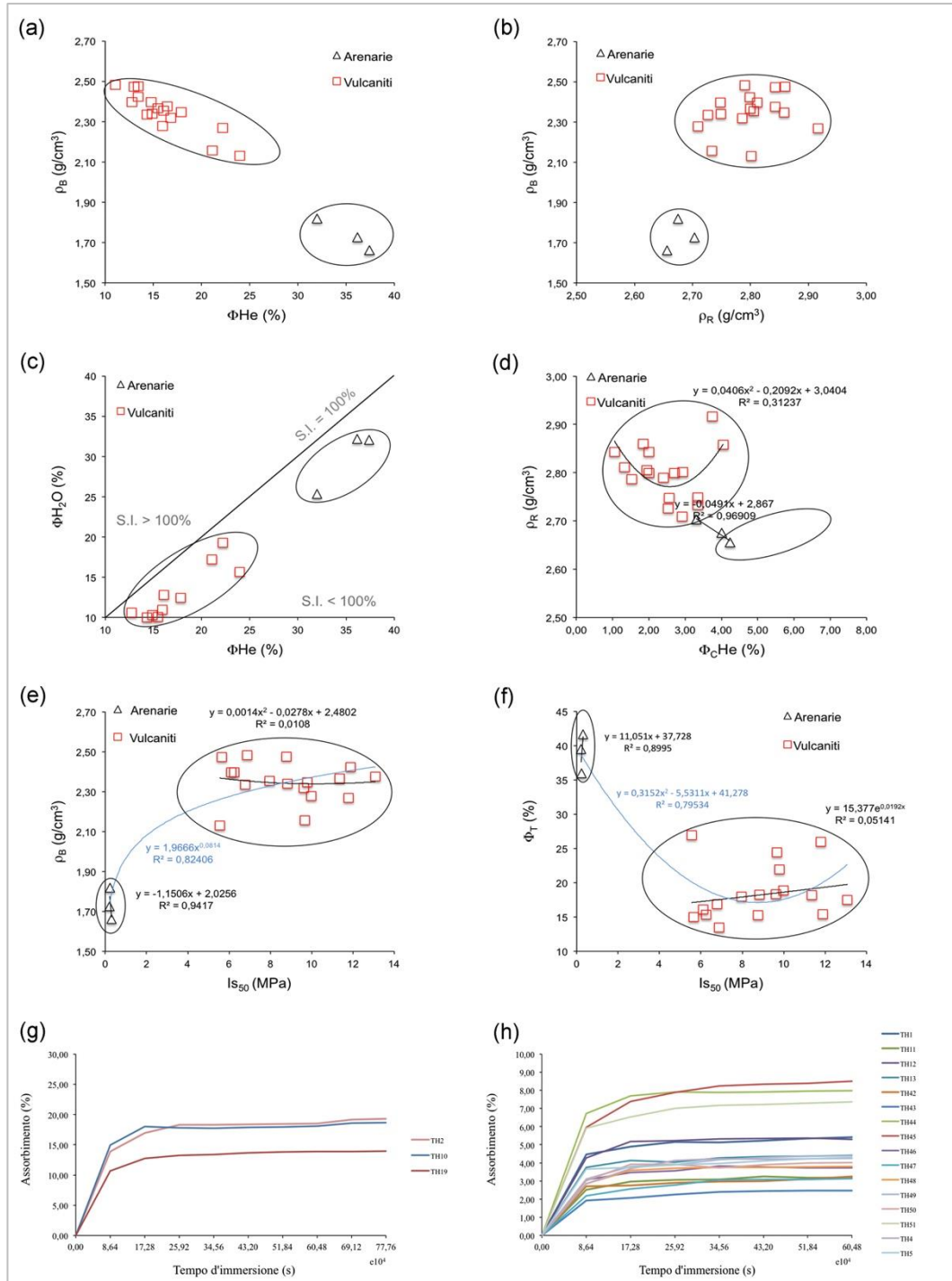


Figura 9.2.1 Caratterizzazioni fisiche delle vulcaniti ed arenarie: (a) porosità aperta all'elio vs densità apparente, (b) densità reale vs densità apparente, (c) porosità aperta all'elio vs porosità aperta all'acqua, (d) porosità chiusa vs densità reale, (e) indice di resistenza a punzonamento vs densità apparente, (f) indice di resistenza a punzonamento vs porosità totale, (g) curva di assorbimento per immersione totale delle arenarie, (h) curva di assorbimento per immersione totale delle vulcaniti.

Campione	Litologia	Umidità	Densità	Densità	Densità	Coefficiente	Porosità	Porosità	Porosità	Porosità	Indice	Indice di
		<i>in situ</i>	reale	apparente	solido	Imbibizione	aperta all'elio	aperta all'acqua	chiusa	totale	dei vuoti	saturazione
		U	ρ_R	ρ_B	ρ_S	CI_w	Φ_{He}	Φ_{H_2O}	Φ_{cHe}	Φ_t	e	S.I.
		(g/g)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	()	(%)
TH2		0,0367	2,66	1,66	2,77	19,29	37,40	32,08	4,23	41,63	0,69	85,77
TH10	Arenaria	0,0415	2,70	1,73	2,79	18,65	36,17	32,19	3,31	39,48	0,64	89,00
TH19		0,0768	2,68	1,82	2,78	13,94	31,98	25,37	4,00	35,98	0,55	79,35
Media aritmetica		0,0517	2,68	1,74	2,78	17,29	35,18	29,88	3,85	39,03	0,63	84,71
Deviazione Standard		0,0219	0,02	0,08	0,01	2,92	2,84	3,90	0,48	2,85	0,07	4,91
TH1		0,0223	2,81	2,35	2,86	5,42	16,07	12,77	1,94	18,01	0,22	79,47
TH3		0,0127	2,71	2,28	2,79	4,81	15,94	10,95	2,92	18,86	0,23	68,69
TH4		0,0185	2,80	2,37	2,88	4,25	15,46	10,05	2,71	18,17	0,22	65,00
TH5		0,0358	2,73	2,34	2,80	4,29	14,34	10,03	2,54	16,87	0,20	69,99
TH11		0,0075	2,86	2,48	2,91	3,19	13,41	7,91	1,84	15,25	0,18	58,95
TH12		0,0212	2,86	2,35	2,97	5,29	17,86	12,43	4,05	21,90	0,28	69,59
TH13		0,0062	2,75	2,40	2,82	4,42	12,75	10,60	2,56	15,32	0,18	83,13
TH42	Vulcanite	0,0077	2,84	2,47	2,90	3,24	13,01	8,02	2,00	15,01	0,18	61,67
TH43	(lastricato del <i>Cardo</i>)	0,0018	2,79	2,48	2,86	2,48	11,06	6,15	2,40	13,45	0,15	55,61
TH44		0,0028	2,73	2,16	2,82	7,98	21,09	17,22	3,34	24,43	0,32	81,66
TH45		0,0164	2,92	2,27	3,03	8,50	22,20	19,30	3,75	25,95	0,35	86,93
TH46		0,0019	2,81	2,40	2,85	3,72	14,76	8,92	1,33	16,09	0,19	60,43
TH47		0,0025	2,80	2,42	2,86	3,12	13,44	7,57	2,00	15,45	0,18	56,32
TH48		0,0022	2,84	2,38	2,87	3,80	16,42	9,02	1,05	17,47	0,21	54,97
TH49		0,0048	2,75	2,34	2,84	4,39	14,88	10,29	3,35	18,23	0,22	69,11
TH50		0,0062	2,79	2,32	2,83	4,02	16,80	9,31	1,52	18,32	0,22	55,46
TH51		0,0090	2,80	2,13	2,88	7,36	23,98	15,68	2,93	26,91	0,36	65,37
Media aritmetica		0,0106	2,80	2,35	2,87	4,72	16,09	10,95	2,48	18,57	0,23	67,20
Deviazione Standard		0,0095	0,05	0,10	0,06	1,73	3,49	3,55	0,85	3,96	0,06	10,35

Tabella 9.2.1: Proprietà fisiche delle arenarie e delle vulcaniti di Tharros.

Campione	Litologia	Assorbimento %								
		8,64 e10 ⁴ s	17,28 e10 ⁴ s	25,92 e10 ⁴ s	34,56 e10 ⁴ s	43,20 e10 ⁴ s	51,84 e10 ⁴ s	60,48 e10 ⁴ s	69,12 e10 ⁴ s	77,76 e10 ⁴ s
TH2	Arenaria	13,89	16,99	18,29	18,33	18,38	18,46	18,51	19,20	19,29
TH10		14,94	18,04	17,81	17,76	17,87	17,95	18,08	18,63	18,65
TH19		10,67	12,73	13,22	13,36	13,66	13,79	13,87	13,91	13,94
TH1	Vulcanite (lastricato del <i>Cardo</i>)	4,46	4,90	5,14	5,12	5,23	5,35	5,42	N.D.	N.D.
TH3		3,91	3,71	3,61	4,21	4,44	4,77	4,81	N.D.	N.D.
TH4		2,85	3,69	4,14	4,22	4,21	4,23	4,25	N.D.	N.D.
TH5		3,66	3,76	3,89	3,96	4,10	4,23	4,29	N.D.	N.D.
TH11		2,51	2,98	3,07	3,10	3,25	3,17	3,19	N.D.	N.D.
TH12		4,28	5,17	5,23	5,33	5,35	5,37	5,29	N.D.	N.D.
TH13		3,75	4,12	4,04	4,27	4,34	4,38	4,42	N.D.	N.D.
TH42		2,71	2,75	2,89	2,97	2,99	3,10	3,24	N.D.	N.D.
TH43		1,92	2,05	2,25	2,39	2,45	2,47	2,48	N.D.	N.D.
TH44		6,73	7,69	7,91	7,88	7,91	7,95	7,98	N.D.	N.D.
TH45		5,96	7,39	7,89	8,24	8,34	8,39	8,50	N.D.	N.D.
TH46		3,05	3,47	3,57	3,81	3,77	3,72	3,72	N.D.	N.D.
TH47		2,19	2,56	2,78	3,06	3,08	3,10	3,12	N.D.	N.D.
TH48		2,86	3,59	3,70	3,76	3,76	3,78	3,80	N.D.	N.D.
TH49		3,11	3,80	3,91	4,18	4,31	4,37	4,39	N.D.	N.D.
TH50		3,02	3,93	3,91	3,74	3,89	3,98	4,02	N.D.	N.D.
TH51		5,91	6,52	7,00	7,16	7,23	7,30	7,36	N.D.	N.D.

Tabella 9.2.2: Prova di assorbimento per immersione totale delle arenarie e delle vulcaniti di Tharros. N.D. = Non disponibile (test concluso, saturazione raggiunta).

Campione	Litologia	Resistenza a	Resistenza a	Resistenza a
		punzonamento	compressione	trazione
		I_{s50}	R_c	R_t
		(MPa)	(MPa)	(MPa)
TH2		0,31	4,30	0,38
TH10	Arenaria	0,22	3,04	0,27
TH19		0,23	3,23	0,29
Media aritmetica		0,25	3,52	0,31
Deviazione Standard		0,05	0,68	0,06
TH1		7,96	159,16	9,95
TH3		9,98	199,52	12,47
TH4		11,35	238,82	14,19
TH5		6,79	135,71	8,48
TH11		8,77	175,36	10,96
TH12		9,78	195,67	12,23
TH13		6,26	125,18	7,82
TH42	Vulcanite	5,66	90,53	7,07
TH43	(lastricato	6,87	137,48	8,59
TH44	del <i>Cardo</i>)	9,67	193,42	12,09
TH45		11,78	294,59	14,73
TH46		6,10	121,96	7,62
TH47		11,88	296,94	14,85
TH48		13,07	326,85	16,34
TH49		8,83	176,62	11,04
TH50		9,63	192,54	12,03
TH51		5,56	88,94	6,95
Media aritmetica		8,82	187,90	11,02
Deviazione Standard		2,37	73,70	2,96

Tabella 9.2.3: Resistenze meccaniche delle arenarie e delle vulcaniti di Tharros.

9.3 Caratteristiche granulometriche dell'aggregato (PSD, iPSD)

La dissoluzione del legante carbonatico ha permesso di calcolare il rapporto L/A di tutte le malte campionate ad esclusione degli intonachini dove, un aggregato di tipo calcareo, ha richiesto una caratterizzazione granulometrica mediante analisi d'immagine.

Campione	Funzione	L/A	Trattenuto al setaccio (%)									
			8000 μ m	4000 μ m	2000 μ m	1000 μ m	500 μ m	250 μ m	125 μ m	63 μ m	<63 μ m	
TH33	Calcestruzzo pavimentale	0,93	29,92	21,54	15,56	9,69	9,78	5,66	3,32	2,90	1,62	
TH34		0,81	2,38	35,77	26,23	12,58	9,84	7,66	4,35	0,60	0,60	
TH35		0,59	28,38	31,06	13,39	13,44	7,76	4,20	1,77	0,00	0,00	
TH36		0,67	7,49	44,96	20,61	12,27	8,90	3,61	2,15	0,00	0,00	
TH37		0,48	18,10	25,46	18,10	12,50	11,03	6,70	8,09	0,00	0,00	
TH14	Allettamento conci/laterizi	0,94	0,00	19,33	23,43	28,17	14,35	9,28	3,69	1,17	0,59	
TH20		0,90	0,00	20,82	24,30	21,66	17,55	8,66	4,55	1,88	0,58	
TH21		1,05	0,00	21,79	22,65	22,22	11,54	8,55	6,41	5,98	0,85	
TH22		1,77	0,00	13,09	16,75	27,23	19,90	16,75	4,19	1,05	1,05	
TH23		1,23	0,00	25,91	32,12	22,28	8,81	5,70	3,11	1,04	1,04	
TH24		1,24	0,00	0,00	0,00	29,67	52,60	15,02	2,71	0,00	0,00	
TH25		1,48	0,00	25,23	28,04	22,43	13,08	8,41	2,80	0,00	0,00	
TH15p		<i>Trullissatio</i>	0,21	0,00	18,27	18,90	20,85	26,77	8,09	3,97	1,89	1,26
TH16p			0,30	0,00	21,94	20,25	16,93	23,91	8,35	5,79	1,69	1,13
TH17p	0,19		0,00	25,05	20,04	10,94	22,13	10,73	6,10	3,34	1,67	
TH28	0,71		0,00	17,54	22,63	17,03	25,18	11,23	5,26	1,13	0,00	
TH29	0,59		0,00	19,82	18,81	17,84	20,58	13,14	8,79	1,02	0,00	
TH30	0,56		0,00	40,77	22,71	9,34	9,55	7,15	5,83	1,55	3,10	
TH31	0,74		0,00	13,31	20,43	23,52	21,70	19,50	1,55	0,00	0,00	
TH32	0,52		0,00	15,66	22,78	19,03	18,27	22,70	1,57	0,00	0,00	
TH8	Arriccio	1,21	0,00	22,88	10,26	11,91	29,59	17,24	5,76	1,58	0,79	
TH38a		1,52	0,00	0,00	14,33	21,05	27,00	30,69	4,74	1,10	1,10	
TH39a		1,72	0,00	0,00	8,39	19,97	51,11	15,65	3,30	1,05	0,52	
TH40a		1,00	0,00	16,89	18,05	21,60	31,15	10,39	1,92	0,00	0,00	
TH9	Intonachino	5,76	0,00	0,00	5,56	16,67	33,33	22,22	16,67	5,56	0,00	
TH38b		3,01	0,00	0,00	0,00	0,19	50,24	35,73	13,84	0,00	0,00	
TH39b		6,90	0,00	0,00	0,00	6,03	54,79	32,05	7,12	0,00	0,00	
TH40b		5,84	0,00	0,00	0,00	3,33	56,67	26,67	13,33	0,00	0,00	
TH26	Calcestruzzo volte	0,71	0,00	0,00	10,26	25,45	30,04	23,37	5,52	3,42	1,95	
TH27		0,98	0,00	0,00	10,15	26,72	27,26	26,46	5,37	2,70	1,34	

Tabella 9.3.1: Rapporto Legante/Aggregato e percentuale di trattenuto al relativo setaccio.

Si registra $0,48 < L/A < 0,93$ con media di 0,70 nei calcestruzzi pavimentali, valori fra i più bassi identificati. Nelle malte di allettamento di conci/laterizi i rapporti L/A appaiono relativamente alti con $0,90 < L/A < 1,77$ e media di 1,23 (Tab. 9.3.1).

Nei *Trullissatio*, la massiva presenza di *Cocciopesto* conferisce magrezza alla malta con rapporti L/A più bassi di tutti i gruppi e compresi fra 0,19 e 0,74 con media di 0,48.

Con il diminuire dello spessore delle gettate si assiste a rapporti L/A sensibilmente più elevati come negli arricci dove $1 < L/A < 1,72$ con media di 1,36. Gli intonachini per via dei loro spessori massimi di 1 cm sono malte relativamente grasse con $3,01 < L/A < 6,9$ e media 5,38.

Nei calcestruzzi delle volte invece si assiste ad un rapporto medio $L/A = 0,85$.

Per quanto riguarda le caratteristiche dei fusi granulometrici, il gruppo dei calcestruzzi pavimentali, come visibile in Tab. 9.3.1, presenta un aggregato in prevalenza grossolano classificabile come ghiaia (pebble, Wentworth 1922) nei campioni TH33, 35 e 37 dove i trattenuti massimi sono localizzati ai setacci di 8000 e 4000 μm . In TH34 (Fig. 9.3.1a, b) e TH36, l'aggregato è meno grossolano ed è centrato sui setacci di 4000-2000 μm , classificabile come ghiaia molto fine (granule).

Campione	Funzione	Passante cumulativo (%)								
		8000 μm	4000 μm	2000 μm	1000 μm	500 μm	250 μm	125 μm	63 μm	<63 μm
TH33	Calcestruzzo pavimentale	70,08	48,53	32,97	23,28	13,49	7,84	4,52	1,62	0,00
TH34		97,62	61,85	35,62	23,04	13,20	5,54	1,19	0,60	0,00
TH35		71,62	40,56	27,18	13,73	5,97	1,77	0,00	0,00	0,00
TH36		92,51	47,54	26,93	14,66	5,76	2,15	0,00	0,00	0,00
TH37		81,90	56,44	38,33	25,83	14,79	8,09	0,00	0,00	0,00
TH14	Allettamento conci/laterizi	100,00	80,67	57,25	29,08	14,73	5,45	1,76	0,59	0,00
TH20		100,00	80,67	57,25	29,08	14,73	5,45	1,76	0,59	0,00
TH21		100,00	78,21	55,56	33,33	21,79	13,25	6,84	0,85	0,00
TH22		100,00	86,91	70,16	42,93	23,04	6,28	2,09	1,05	0,00
TH23		100,00	74,09	41,97	19,69	10,88	5,18	2,07	1,04	0,00
TH24		100,00	100,00	100,00	70,33	17,73	2,71	0,00	0,00	0,00
TH25		100,00	74,77	46,73	24,30	11,21	2,80	0,00	0,00	0,00
TH15p		<i>Trullissatio</i>	100,00	81,73	62,83	41,98	15,21	7,12	3,15	1,26
TH16p	100,00		78,06	57,81	40,87	16,96	8,61	2,81	1,13	0,00
TH17p	100,00		74,95	54,91	43,97	21,84	11,11	5,01	1,67	0,00
TH28	100,00		82,46	59,83	42,80	17,62	6,39	1,13	0,00	0,00
TH29	100,00		80,18	61,37	43,53	22,95	9,81	1,02	0,00	0,00
TH30	100,00		59,23	36,52	27,17	17,63	10,48	4,65	3,10	0,00
TH31	100,00		86,69	66,26	42,74	21,05	1,55	0,00	0,00	0,00
TH32	100,00		84,34	61,57	42,54	24,27	1,57	0,00	0,00	0,00
TH8	Arriccio	100,00	77,12	66,86	54,95	25,36	8,13	2,37	0,79	0,00
TH38a		100,00	100,00	85,67	64,63	37,63	6,94	2,20	1,10	0,00
TH39a		100,00	100,00	91,61	71,64	20,52	4,88	1,57	0,52	0,00
TH40a		100,00	83,11	65,07	43,46	12,31	1,92	0,00	0,00	0,00
TH9	Intonachino	100,00	100,00	94,44	77,78	44,44	22,22	5,56	0,00	0,00
TH38b		100,00	100,00	100,00	99,81	49,57	13,84	0,00	0,00	0,00
TH39b		100,00	100,00	91,61	71,64	20,52	4,88	1,57	0,52	0,00
TH40b		100,00	83,11	65,07	43,46	12,31	1,92	0,00	0,00	0,00
TH26	Calcestruzzo volte	100,00	100,00	89,74	64,30	34,26	10,89	5,37	1,95	0,00
TH27		100,00	100,00	89,85	63,12	35,86	9,41	4,04	1,34	0,00

Tabella 9.3.2: Passanti cumulativi al relativo setaccio.

Nel gruppo appena descritto, i passanti cumulativi (Tab. 9.3.2) ed i relativi coefficienti di uniformità (Tab. 9.3.3), rientrano nel intervallo $2 < U < 11,25$ per granulometrie sempre di tipo vario ad eccezione del campione TH34.

Nelle malte di allettamento dei conci/laterizi, si osserva come nei campioni TH14 (Fig. 9.3.1c, d), 20, 21 il trattenuto sia centrato principalmente nei setacci 2000 e 1000 μm (aggregato di tipo sabbioso molto grossolano, very coarse sand). In TH22 il massimo trattenuto è registrato ai setacci

1000-500 μm mentre in TH24 (Fig. 9.3.1e, f), l'aggregato è leggermente più fine con trattenuto massimo ai setacci 500-1000 μm . Il campione TH25 presenta invece un trattenuto più abbondante al 4000 e 2000 μm con granulometria leggermente più grossolana classificabile come ghiaia molto fine (granule). Nel gruppo, i coefficienti di uniformità variano in un intervallo da 2 a 12,10 con granulometrie di tipo prevalentemente uniforme (Tab. 9.3.3).

Campione	Funzione	Diametro determinante al 60% D_{60} (μm)	Diametro determinante al 10% D_{10} (μm)	Coefficiente di uniformità $U = D_{60}/D_{10}$	Tipo di granulometria
TH33		5900	850	6,94	Varia
TH34		800	400	2	Uniforme
TH35	Calcestruzzo pavimentale	5000	800	6,25	Varia
TH36		5000	500	10	Varia
TH37		4500	400	11,25	Varia
TH14		2200	380	5,78	Varia
TH20		2200	390	5,64	Varia
TH21		2300	190	12,10	Varia
TH22	Allettamento conci/laterizi	1500	300	5	Uniforme
TH23		2000	400	5	Uniforme
TH24		800	400	2	Uniforme
TH25		1900	480	3,95	Uniforme
TH15p		1800	380	4,73	Uniforme
TH16p		2200	300	7,33	Varia
TH17p	<i>Trullissatio</i>	2500	230	10,86	Varia
TH28		2000	350	5,71	Varia
TH29		1900	250	7,6	Varia
TH30		4000	250	16	Molto varia
TH31		1700	360	4,72	Uniforme
TH32		1900	240	7,91	Varia
TH8		Arriccio	1400	300	4,66
TH38a	900		290	3,1	Uniforme
TH39a	850		350	2,42	Uniforme
TH40a	4000		250	16	Molto varia
TH9	Intonachino	700	160	4,37	Uniforme
TH38b		590	300	1,96	Uniforme
TH39b		650	280	2,32	Uniforme
TH40b		640	230	2,78	Uniforme
TH26	Calcestruzzo volte	900	250	3,6	Uniforme
TH27		900	270	3,33	Uniforme

Tabella 9.3.3: Diametri determinanti D_{10} - D_{60} e coefficienti d'uniformità U dell'aggregato analizzato.

Nei *Trullissatio* i fusi granulometrici dei campioni appaiono molto differenti. All'interno del gruppo, i campioni TH15p, TH16p e TH17p appartengono ad una serie stratigrafica di malte utilizzata per l'impermeabilizzazione di una cisterna localizzata nella città alta.

Si tratta di tre strati in successione con distribuzioni granulometriche differenti.

In TH15p, strato più interno, un coefficiente di uniformità $U = 2,73$ identifica una granulometria uniforme in cui il trattenuto è centrato principalmente ai setacci di 500 e 1000 μm (Tab. 9.3.1).

I successivi *Trullissatio* TH16p e TH17p (Fig. 9.3.2a, b), sono granulometricamente vari con $U =$

7,33 e 10,86 rispettivamente. La particolarità di questi due campioni è identificata nel trattenuto bimodale in entrambi 500-4000 μm con lacuna granulometrica a 2000 e soprattutto 1000 μm . In TH28 e TH29 è registrata una granulometria bimodale con trattenuto massimo 500-2000 μm e coefficienti di uniformità pari a 5,71 e 7,6 rispettivamente (granulometria varia).

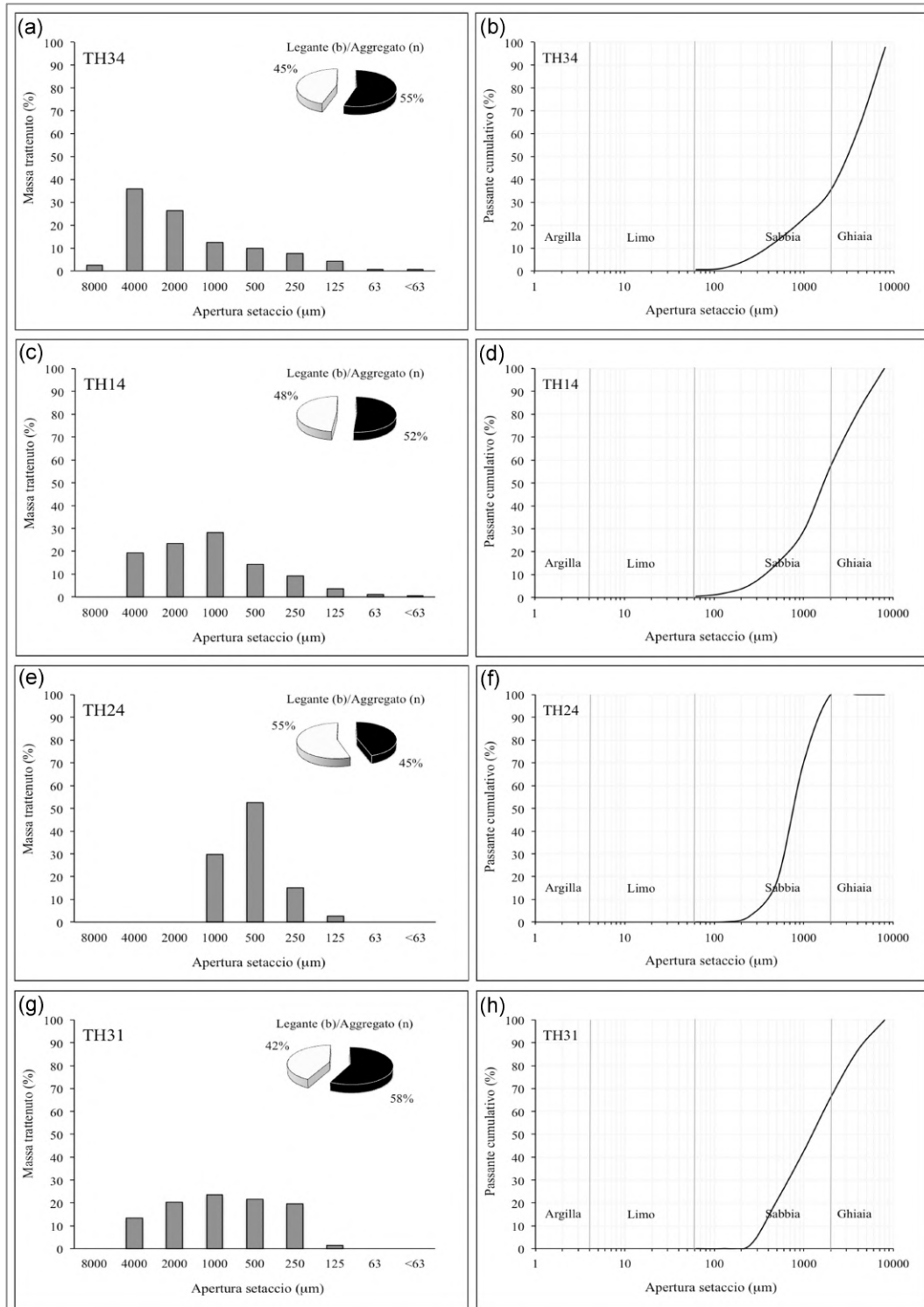


Figura 9.3.1: Esempi d'istogrammi di trattenuto ai setacci e rapporto L/A: (a, b) calcestruzzo pavimentale TH34, (b, c) malta di allettamento dei conci/laterizi TH14, (e, f) malta di allettamento dei conci/laterizi TH24, (g, h) *Trullissatio* TH31.

Gli arricci sono caratterizzati da coefficienti di uniformità compresi fra 2,42 e 16 (Tab. 9.3.2, 9.3.3). Sono uniformi le granulometrie di TH8 (Fig. 9.3.2c, d), TH38a e TH39a mentre TH40a mostra una granulometria molto varia. TH8 si differenzia dagli altri campioni per una marcata bimodalità dell'aggregato centrato A 500-4000 μm con lacuna ai 1000-2000 μm .

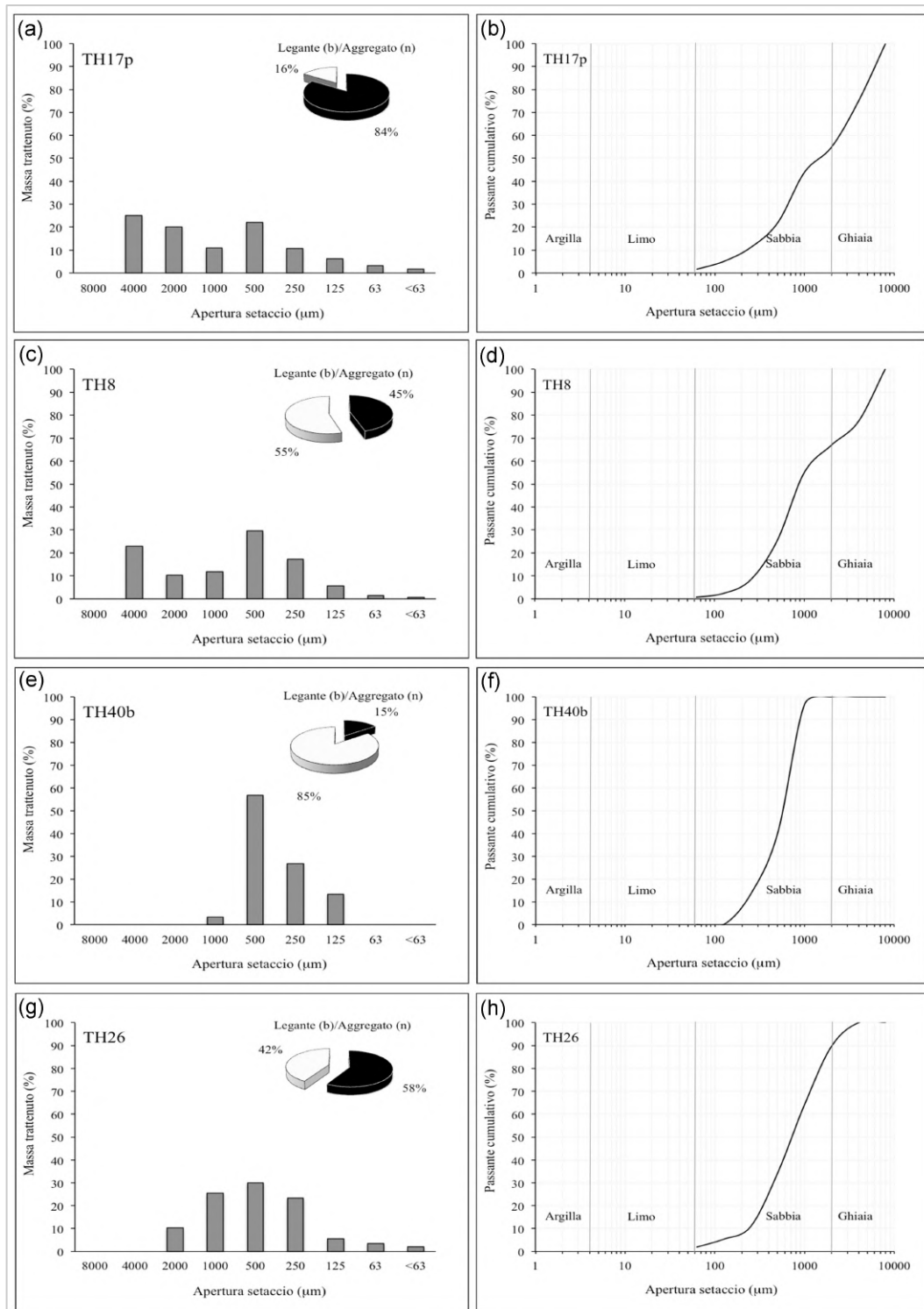


Figura 9.3.2: Esempi di istogrammi di trattenuto ai setacci e rapporto L/A: (a, b) *Trullissatio* TH17p, (b, c) arriccio TH8, (e, f) intonachino TH40b, (g, h) calcestruzzo delle volte TH26.

In TH38a il trattenuto è centrato ai setacci di 250 e 500 μm (sabbia media). In TH39a e TH40a l'aggregato è leggermente più grossolano centrato a 500 e 1000 μm .

Negli intonachini si assiste a campioni con granulometria molto fine centrata ai setacci di 500 e 250 μm relativi a sabbie medie (medium sand). I coefficienti di uniformità sono sufficientemente bassi ($1,96 < U < 4,37$) da considerare le granulometrie come uniformi in tutti i campioni.

Nei calcestruzzi delle volte TH26 (Fig. 9.3.2g, h) e TH27, i fusi granulometrici dei due campioni sono molto simili fra loro con coefficienti di uniformità pari a 3,6 e 3,3 (granulometrie uniformi). In entrambi i campioni il trattenuto massimo è centrato a 500 e 1000 μm con granulometria rientrante nell'intervallo dimensionale delle sabbie grossolane.

Le malte delle Terme II di Tharros appena descritte, presentano dei rapporti L/A inversamente proporzionali allo spessore delle gettate. Su un totale di 30 malte campionate, solo 14 (46%) presenta granulometria da varia a molto varia, come raccomandato da Vitruvio. Il restante 54% presenta granulometrie di tipo uniforme.

Alcuni gruppi di malta come gli intonachini ed i calcestruzzi delle volte, presentano campioni con granulometrie solo di tipo uniforme mentre negli altri gruppi si assiste a campioni con granulometria sia uniforme che varia, in alcuni casi anche molto varia.

Lacune granulometriche e bimodalità sono registrate nei campioni di *Trullissatio* a causa della presenza di due tipologie di aggregato ovvero *Cocciopesto* e cristallo-clasti rappresentati ognuno da una propria moda.

9.4 Diffrazione a Raggi X sulle malte (XPRD)

L'analisi mineralogica semi-quantitativa delle malte è mostrata in Tab. 9.4.1 e Fig. 9.4.1. In tutti i campioni la calcite è da abbondante a molto abbondante, da attribuire principalmente al legante carbonatico. Negli intonachini, parte della calcite identificata in XPRD deriva dall'aggregato calcareo utilizzato in questo tipo di malta per motivi strettamente estetici (vedi Paragrafo 9.1.2).

Polimorfi di carbonato di calcio quali vaterite ed aragonite sono stati identificati in diffrazione, e sono entrambi attribuibili alla presenza di bioclasti e/o alla temperatura di carbonatazione della Portlandite (Cole & Kroone 1960).

Diverse fasi sialiche quali quarzo, plagioclasio e K-feldspato sono state identificate nelle malte in proporzioni da molto abbondanti ad assenti, alcune volte in traccia (Tab. 9.4.1, Fig. 9.4.1). Queste tre fasi sono dovute alla presenza nelle malte di cristallo-clasti riconducibili alle sabbie litorali utilizzate come aggregato inerte e già osservato in sezione sottile.

Campione	Funzione	Cc	Qz	Pl	Kf	Bio	Ar	Vt	Ill	Zs	Rt
TH33	Calcestruzzo pavimentale	•••	••	•	•	-	-	-	Tr	-	-
TH34		•••	••	•	•	-	-	-	Tr	-	-
TH35		••	••	•	•	•	-	-	-	-	-
TH36		•••	••	•	-	•	-	-	•	-	-
TH23	Allettamento conci/laterizi	••	••	••	•	•	-	-	-	-	-
TH20		•••	••	-	•	-	-	-	-	-	-
TH25		•••	•	••	-	-	•	-	-	-	-
TH24		•••	Tr	••	••	Tr	Tr	-	-	-	-
TH15p	<i>Trullissatio</i>	•••	•	•	•	Tr	-	-	Tr	-	-
TH16p		•••	•	•	Tr	•	-	-	-	-	-
TH17p		•••	•	•	•	Tr	-	-	-	-	-
TH28		•••	••	••	••	-	-	-	Tr	Tr	-
TH8	Arriccio	•••	••	•	•	-	-	-	Tr	-	-
TH38a		••	••	•	••	•	-	Tr	-	-	-
TH39a		••	••	•	••	•	•	-	-	-	-
TH40a		••	••	•	••	•	-	-	-	-	-
TH9	Intonachino	•••	••	•	••	•	-	-	-	-	-
TH38b		•••	••	Tr	••	•	-	Tr	-	-	-
TH39b		•••	••	•	••	•	-	-	-	-	-
TH40b		•••	••	•	•	-	-	-	-	-	-
TH26	Calcestruzzo volte	••	••	•	•	•	-	-	-	-	-
TH27		••	••	•	•	•	-	-	-	-	Tr

Tabella 9.4.1: Esempi di diffrazione (XPRD) su alcune malte dell'edificio termale II: ••• = Molto abbondante; •• = Abbondante; • = Presente; Tr = presente in tracce; - = Non rilevato. Cc = calcite, Qz = quarzo, Pl = plagioclasio, Kf = K-feldspato, Bio = biotite, Ar = aragonite, Vt = vaterite, Ill = illite, Zs = zoisite, Rt = rutilo.

In TH28 tracce di epidoto (zoisite, Fig. 9.4.1c) potrebbero provenire dai litoclasti. La zoisite così come il rutilo (TiO₂) ritrovato nel calcestruzzo delle volte TH27 (Fig. 9.4.1h), potrebbe anche derivare da cristallo-clasti mafici presenti nelle malte come aggregato.

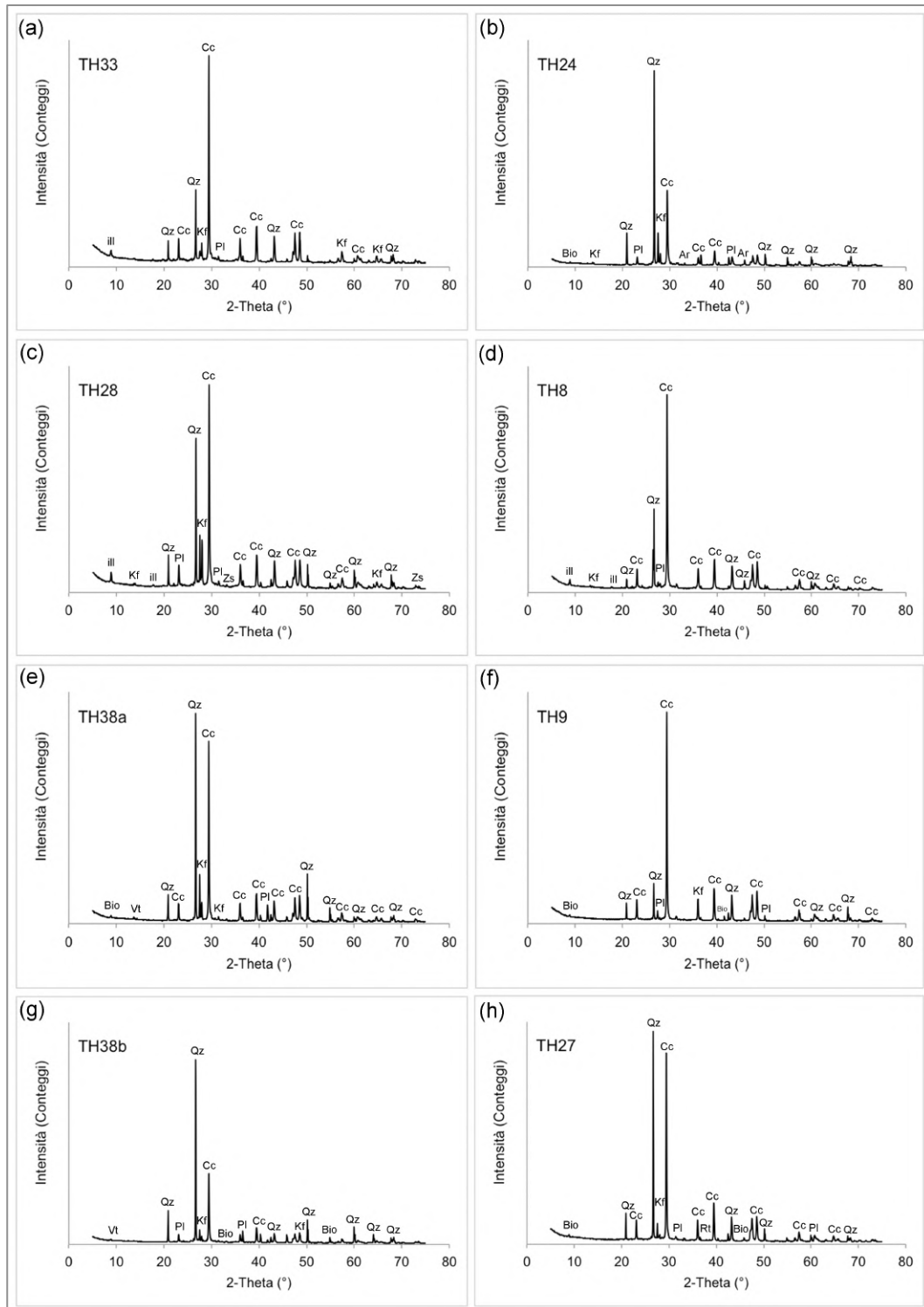


Figura 10.4.1: Esempi di diffrazione (XPRD) eseguita sulle malte delle Terme II di Tharros: (a) calcestruzzo pavimentale TH33, (b) allettamento di conci/laterizi TH24, (c) *Trullissatio* TH28, (d) arriccio TH8, (e) arriccio TH38a, (f) intonachino TH9, (g) intonachino (TH38b), (h) calcestruzzo delle volte (TH27). Cc = calcite, Qz = quarzo, Pl = plagioclasio, Kf = K-feldspato, Bio = biotite, Ar = aragonite, Vt = vaterite, Ill = illite, Zs = zoisite, Rt = rutilo.

9.5 Analisi termo-gravimetrica (TGA) sulla frazione legante

Le curve termo-gravimetriche relative alle malte campionate, mostrate in Fig. 9.5.1a, b, c, d, e, f, mostrano un andamento che riflette sostanzialmente la composizione mineralogica rilevata in OM (Tab. 9.1.2.1) ed in diffrazione (Tab. 9.4.1).

La prima perdita in peso è relativa all'evaporazione dell'acqua di umidità ed avviene a temperature variabili tra 40 e 60 °C (centrate di solito a 50 °C). Tale picco è ad esempio molto evidente nei campioni TH36, TH33, TH16p, TH27 e TH40a, ed è legato essenzialmente al contenuto di umidità *in situ* (U), ovvero alla posizione del campione sul monumento.

In un intervallo di temperatura compreso tra 90 e 150 °C una molto debole rottura di pendenza della curva è visibile solo in alcuni campioni (e.g., TH9, TH36, TH25, TH26, TH27) ed è legata alla rimozione dell'acqua igroscopica.

A temperature comprese tra 520 e 800 °C avviene il processo di decarbonatazione del legante.

Le perdite in peso di anidride carbonica ($\Delta\text{CO}_2\%$) e acqua ($\Delta\text{H}_2\text{O}\%$), riportate in Tab. 9.5.1 ed illustrate in Fig. 9.5.1g, h, evidenziano una certa idraulicità negli intonachini ($\Delta\text{CO}_2 = 16,53 \pm 1,48\%$, $\Delta\text{H}_2\text{O} = 2,21 \pm 2,43\%$) e nei calcestruzzi delle volte ($\Delta\text{CO}_2 = 16,44 \pm 0,13\%$, $\Delta\text{H}_2\text{O} = 2,27 \pm 0,09\%$).

L'idraulicità delle malte sembra essere relativamente bassa negli arricci e nei calcestruzzi pavimentali, dove $\Delta\text{CO}_2 = 22,32 \pm 1,76\%$ e $\Delta\text{CO}_2 = 22,39 \pm 1,13\%$, rispettivamente (Tab. 9.5.1).

Valori intermedi d'idraulicità invece si registrano nei *Trullissatio* e nelle malte di allettamento dei conci/laterizi (Fig. 9.5.1g). Il campione di malta di allettamento dei conci/laterizi TH20 presenta una perdita in peso relativa a $\Delta\text{H}_2\text{O}$ molto bassa (Tab. 9.5.1), che determina un elevato rapporto $\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{H}_2\text{O}$.

L'andamento piuttosto anomalo dell'idraulicità di alcuni gruppi di malte campionate si osserva meglio nella Fig. 9.5.1g e dove i campioni di malta si dispongono sul grafico CO_2 vs $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ con una nuvola di punti a tendenza esponenziale con coefficiente di correlazione $R^2 = 0,73$ (Fig. 9.5.1h). Gli intonachini, che di solito presentano un'idraulicità piuttosto bassa, risultano invece molto pozzolanici.

Negli intonachini le osservazioni OM e la diffrazione non mostrano particolari differenze di mineralogia rispetto agli altri gruppi di malta se non nella presenza di litoclasti calcarei come aggregato. Negli intonachini non sono presenti inoltre aggregati di tipo chiaramente pozzolanico (e.g., frammenti di vulcaniti vetrose, *Cocciopesto*) che avrebbero potuto conferire idraulicità al legante.

È probabile che negli intonachini e nei calcestruzzi delle volte, la maggiore idraulicità rispetto alle

altre malte possa essere correlata ad una differente pozzolanicità della materia prima calcarea usata nella produzione del legante. Il grado d'idraulicità dei calcestruzzi delle volte e degli intonachini potrebbe essere spiegato anche come una scelta volontaria dal costruttore.

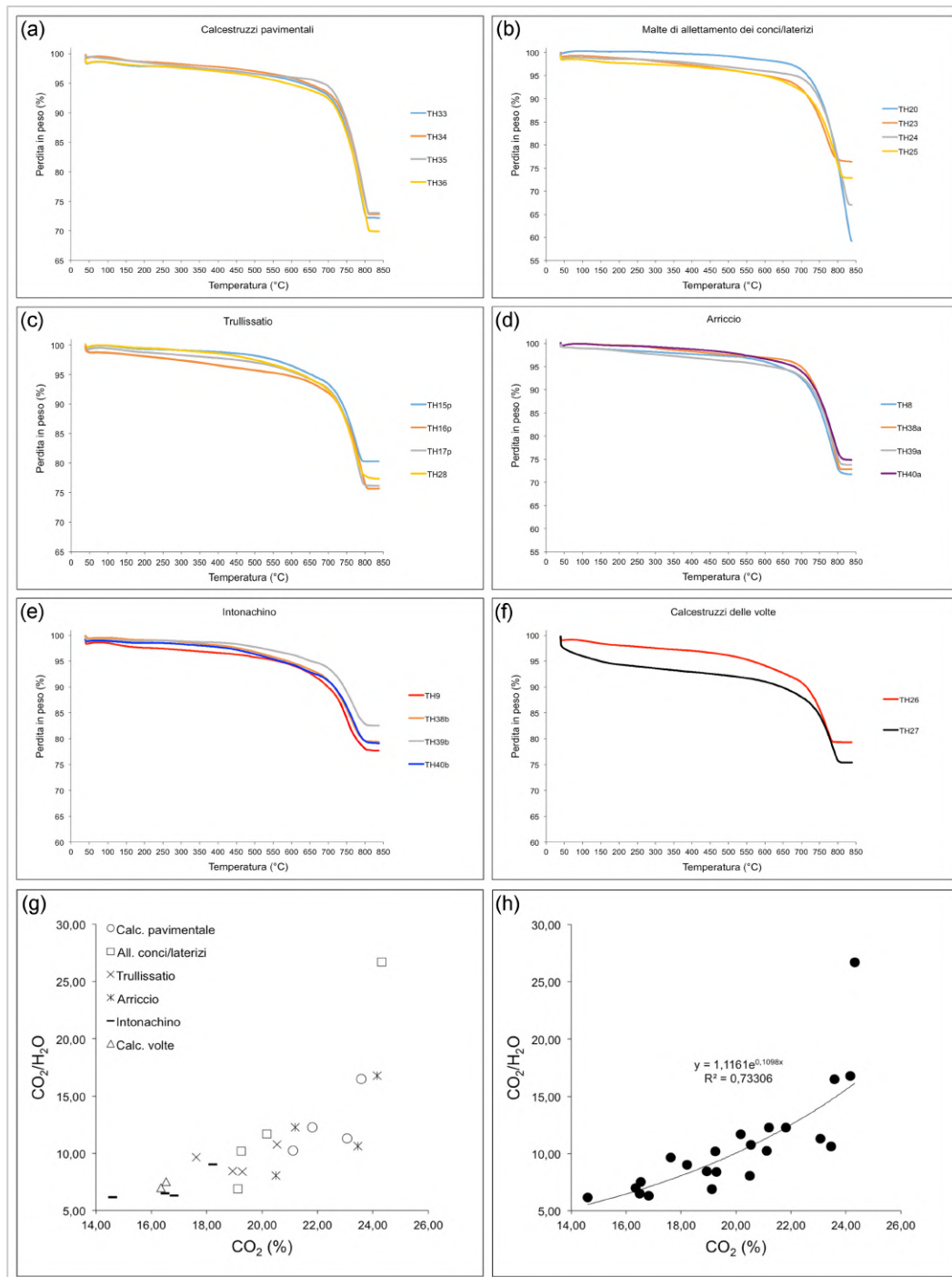


Figura 9.5.1: Analisi termo-gravimetriche sulle malte: (a) curve di decomposizione termica dei calcestruzzi pavimentali, (b) malte di allettamento dei conci/laterizi, (c) *Trullissatio*, (d) arricci, (e) intonachini, (f) calcestruzzi delle volte, (g) rapporto $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ vs CO_2 per le malte campionate suddivise in gruppi, (h) rapporto $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ vs CO_2 per le malte campionate riunite in una sola serie.

Il fine sarebbe stato quello di ottimizzare le resistenze meccaniche della malta. Queste malte, infatti, sono utilizzate in parti dell'edificio particolarmente soggette a sollecitazioni, come nel caso delle

volte o in pareti a vista che presentavano anche degli affreschi (come nel caso degli intonachini) e dovevano avere buone capacità di resistenza all'umidità in ambienti come quello termale. Negli intonachini inoltre, una delle probabili spiegazioni dell'idraulicità anomala potrebbe essere legata ad una non efficace separazione del legante dall'aggregato in fase di preparazione del campione "arricchito" su cui è stata poi fatta l'analisi termo-gravimetrica. Infatti, l'aggregato calcareo degli intonachini, presente in percentuali di oltre il 90%, ha una colorazione biancastra ed è difficilmente distinguibile dal legante. Lo scopo dell'aggregato calcareo, fra l'altro, era proprio questo ovvero confondersi col legante affinché la colorazione della malta risultasse omogenea. È probabile quindi che questo abbia in parte falsato il dato finale.

Ulteriori analisi circa la composizione del legante degli intonachini sono mostrate nel paragrafo successivo 9.6.

Campione	Funzione	Peso perso per range di temperatura (%)		$\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{H}_2\text{O}$
		200-520 °C ($\Delta\text{H}_2\text{O}$)	520-800 °C (ΔCO_2)	
TH33	Calcestruzzo pavimentale	1,43	23,57	16,49
TH34		1,78	21,82	12,26
TH35		2,06	21,12	10,25
TH36		2,04	23,07	11,31
Media aritmetica		1,83	22,39	12,58
Deviazione standard	0,29	1,13	2,73	
TH20	Allettamento conci/laterizi	0,91	24,31	26,71
TH23		2,77	19,11	6,91
TH24		1,89	19,24	10,18
TH25		1,73	20,16	11,67
Media aritmetica		1,82	20,71	13,87
Deviazione standard	0,76	2,45	8,79	
TH15p	<i>Trullissatio</i>	1,82	17,63	9,67
TH16p		2,24	18,93	8,45
TH17p		1,91	20,54	10,75
TH28		2,30	19,29	8,40
Media aritmetica		2,07	19,10	9,32
Deviazione standard	0,24	1,20	1,12	
TH8	Arriccio	1,44	24,15	16,77
TH38a		2,21	23,46	10,62
TH39a		2,55	20,49	8,04
TH40a		1,73	21,19	12,28
Media aritmetica		1,98	22,32	11,93
Deviazione standard	0,49	1,76	3,67	
TH9	Intonachino	2,02	18,21	9,01
TH38b		2,67	16,81	6,30
TH39b		2,37	14,61	6,16
TH40b		2,54	16,49	6,49
Media aritmetica		2,40	16,53	6,99
Deviazione standard	0,28	1,48	1,35	
TH26	Calcestruzzo volte	2,21	16,53	7,50
TH27		2,33	16,35	7,01
Media aritmetica		2,27	16,44	7,25
Deviazione standard	0,09	0,13	0,35	

Tabella 9.5.1: Analisi termo-gravimetriche: percentuale di peso perso in intervalli di temperatura da 200-520 °C e 520-800 °C

9.6 Analisi in microscopia elettronica (SEM-EDS) sulle malte

L'analisi al microscopio elettronico a scansione e microsonda (SEM-EDS) con associata osservazione OM sulle malte delle Terme II, ha avuto il fine di approfondire le differenze d'idraulicità riscontrate all'interno dei gruppi funzionali come osservabile nella Fig. 9.5.1g, h, e nella Tab. 9.5.1, entrambe riguardanti le analisi termo-gravimetriche (TGA).

Le indagini SEM-EDS hanno in parte spiegato il motivo dell'anomala idraulicità degli intonachini. In Fig. 9.6.1 è mostrata una mappatura chimica al contatto tra l'intonachino del campione TH9 (sulla sinistra in foto) e l'arriccio del campione TH8 (sulla destra). I due campioni presentano una differente idraulicità con $\Delta\text{CO}_2 = 18,21\%$ e $\Delta\text{CO}_2 = 24,15\%$ rispettivamente.

La più elevata idraulicità del legante del campione TH9 rispetto a quello del campione TH8 è spiegata da contenuti di Si ad Al molto più elevati rispetto a quelli dell'arriccio, caratterizzato invece da un legante prettamente carbonatico (aereo). In figura si nota inoltre come parte dei frammenti di aggregato presenti nell'intonachino sia di tipo calcareo a confermare le osservazioni effettuate in OM, così come l'aggregato dell'arriccio sia invece silicatico (Fig. 9.6.1).

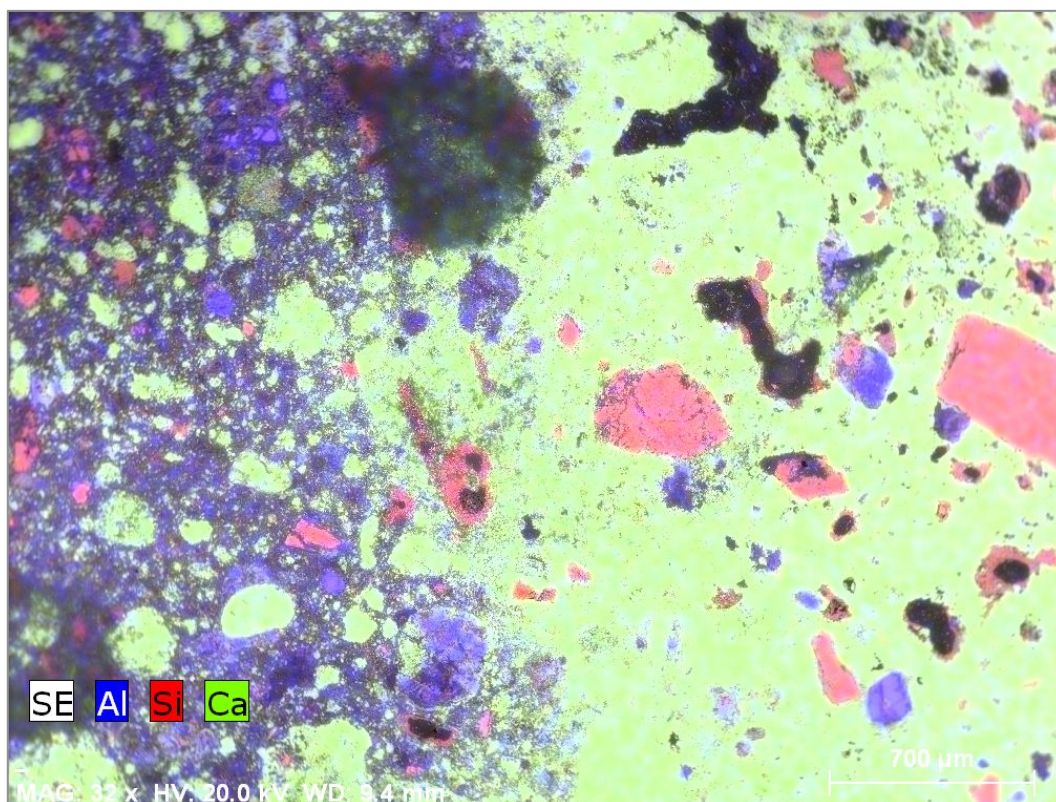


Figura 9.6.1: Mappatura chimica in SEM-EDS di Al, Si e Ca all'interfaccia di contatto tra intonachino del campione TH9 (sulla sinistra) ed l'arriccio del campione TH8 (sulla destra).

Oltre alla composizione degli intonachini, in microscopia elettronica è stato indagato anche il processo di scambio chimico tra un frammento di ossidiana rinvenuto nel *Trullissatio* TH28 ed il legante carbonatico (Fig. 9.6.2).

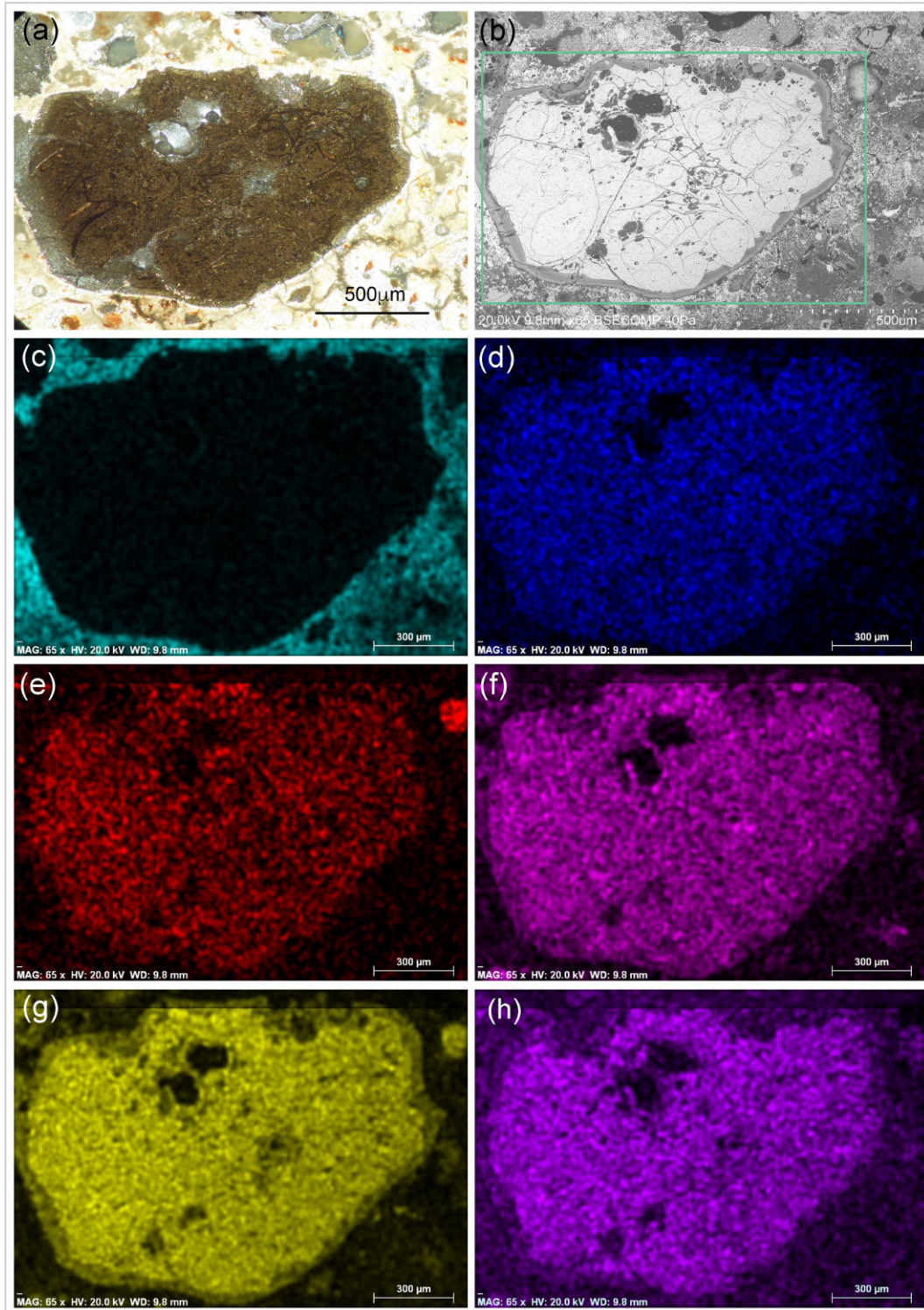


Figura 9.6.2: Mappature chimiche in SEM-EDS su un frammento di aggregato ossidiano (*Trullissatio* TH28): (a) immagine al microscopio petrografico (OM), (b) immagine in microscopia elettronica (SEM-SE), (c) mappatura dell'elemento calcio, (d) mappatura dell'elemento potassio, (e) mappatura dell'elemento sodio, (f) mappatura dell'elemento alluminio, (g) mappatura dell'elemento silicio, (h) mappatura dell'elemento ossigeno.

Nel frammento in questione, fotografato al microscopio polarizzatore (Fig. 9.6.2a), si nota la tipica fessurazione sferulitica interna al frammento di vetro vulcanico con fratturazione pseudo-concoide lungo il margine. Su questo è presente un evidente bordo di reazione con il legante carbonatico di spessore medio circa 60-70 μm .

Le mappature chimiche, innanzi tutto, mostrano un'evidente forte presenza del calcio nel legante carbonatico (Fig. 9.6.2c). Nell'ossidiana il contenuto di calcio è molto basso (di solito il calcio espresso in ossido si aggira in una roccia basaltica intorno al 4-6% in peso). L'ossidiana risulta maggiormente ricca di elementi alcalini quali K ed Na (Fig. 9.6.2d, e), Al, Si ed O rispetto al legante circostante (Fig. 9.6.2f, g, h), evidenziando la chiara composizione silicatica del frammento vulcanico.

Focalizzando l'attenzione lungo il bordo di reazione, si osserva un chiaro rilascio di Si dal frammento verso il legante. Inoltre, anche per quanto riguarda Al e O si nota che lungo il bordo di reazione la loro concentrazione diminuisce rispetto al nucleo. Il processo di tale scambio chimico è ben visibile soprattutto nell'alluminio e silicio (Fig. 9.6.2f, g) dove si nota come l'intensità del tematismo relativo all'elemento sia minore nella zona del bordo di reazione rispetto al nucleo.

Per quanto concerne gli altri elementi, quali Ca, K, Na, non è stata identificata una particolare variabilità di concentrazione sul bordo di reazione. Tuttavia, anche se non chiaramente mostrato dalle immagini qui presentate, probabilmente è presente anche una maggiore concentrazione di calcio nel bordo di reazione del frammento vulcanico rispetto alla sua stessa matrice vetrosa interna, così come già evidenziato da alcuni autori nello studio delle malte Romane del Teatro di Nora (Columbu & Garau 2017).

Questo processo di scambio chimico all'interfaccia tra aggregato vulcanico e legante evidenzia pertanto la chiara attività pozzolanica dei frammenti ossidaneici vetrosi con la formazione di fasi idrauliche CSH / CAH sul bordo di reazione.

Le terme del Forum Traiani: risultati e discussioni

10.1 Caratteristiche petrografiche (OM)

10.1.1 Rocce (ignimbriti)

Le ignimbriti utilizzate nella costruzione del sito archeologico sono rappresentate da diverse litofacies vulcaniche caratterizzate da una diversa colorazione macroscopica. Come si osserva in Fig. 10.1.1.1a, b, c, d, e, esse presentano colorazioni tendenti al verdastro (CIELAB 60*-5*2), rossastro (CIELAB 40*8*5), grigio (CIELAB 59*-2*4), rosato (CIELAB 59*1*-3) e celeste chiaro (CIELAB 57*-4*1). Questi due ultimi colori sembrano appartenere a *facies* di transizione tra rossastro e grigio nel primo caso, verdastro e grigio nel secondo. Le stesse colorazioni sono state rilevate nei campioni di affioramento come si osserva in Fig. 10.1.1.1f, g, h.

In sezione sottile le rocce presentano una struttura porfirica (con un indice di porfiricità $5 < I.P. < 10\%$) per fenocristalli di plagioclasio, opachi, K-feldspato e rara biotite.

Il plagioclasio (presente nell'ordine del 60,5% dei fenocristalli), è rappresentato da cristalli spesso fortemente corrosi e riassorbiti (relitti; Fig. 10.1.1.2a, b, c), con dimensioni variabili da circa 50 μm sino a rari casi a 0,8 mm. La composizione del plagioclasio, misurata su un numero rappresentativo d'individui, mostra un contenuto in anortite del 50-70% (labradorite).

Il K-feldspato (35%) consiste anch'esso in cristalli relitti, fortemente corrosi e riassorbiti con dimensioni che variano da 50 μm a 1 mm.

I minerali opachi (3%) presentano forme prevalentemente circolari riconducibili principalmente a magnetite.

La biotite (0,5%) è rappresentata da cristalli anedrali con bordi di alterazione di colorazione scura e dimensioni medie di 200 μm .

La pasta di fondo è costituita da una matrice cineritica vetrosa in cui sono presenti litici (4%, Fig. 10.1.1.2d) e pomici (da 5% a 15%). I litici sono spesso interessati da alterazioni polifasiche (iddingsite) mentre sulle pomici si assiste a frequenti processi di devettrificazione. In alcuni casi, come nei campioni FTc20 ed FTc22, le pomici hanno forma appiattita ed allungata secondo i piani di flusso delle vulcaniti, disposte in allineamenti regolari pseudo-paralleli e in alcuni casi curvilinei (tessitura eutassitica, Fig. 10.1.1.2e). Nella pasta di fondo sono presenti microliti di cristalli sialici non risolvibili al microscopio polarizzatore (Fig. 10.1.1.2f), spesso rappresentati da quarzo.

Sulla base del contenuto di minerali sialici (QAPF, Streckeisen 1974), queste rocce sono classificabili come riolaciti e rioliti. Per comodità, nei capitoli successivi le chiameremo ignimbriti.

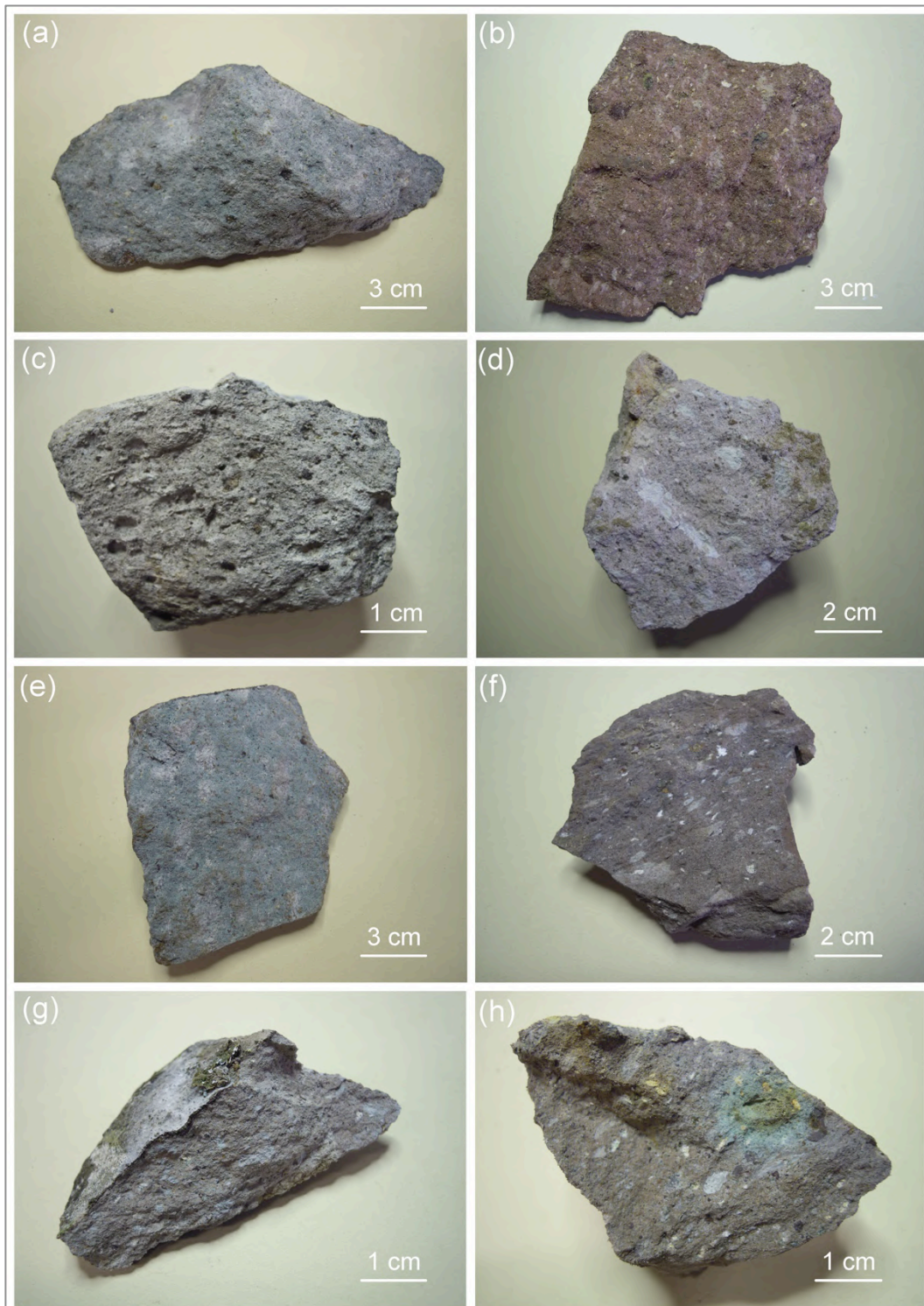


Figura 10.1.1: Caratteristiche macroscopiche delle ignimbriti (rioliti/riolaciti) del sito di Forum Traiani: (a) campione monumentale FT16 (*facies verdastra*), (b) campione monumentale FT14 (*facies rossastra*), (c) campione monumentale FT4 (*facies grigia*), (d) campione monumentale FT2 (*facies rosata*), (e) campione monumentale FT28 (*facies celeste chiaro*), (f) campione di affioramento FTc20 (*facies rossastra*), (g) campione di affioramento FTc21 (*facies grigia*), (h) campione di affioramento FTc21 (*facies rosata*).

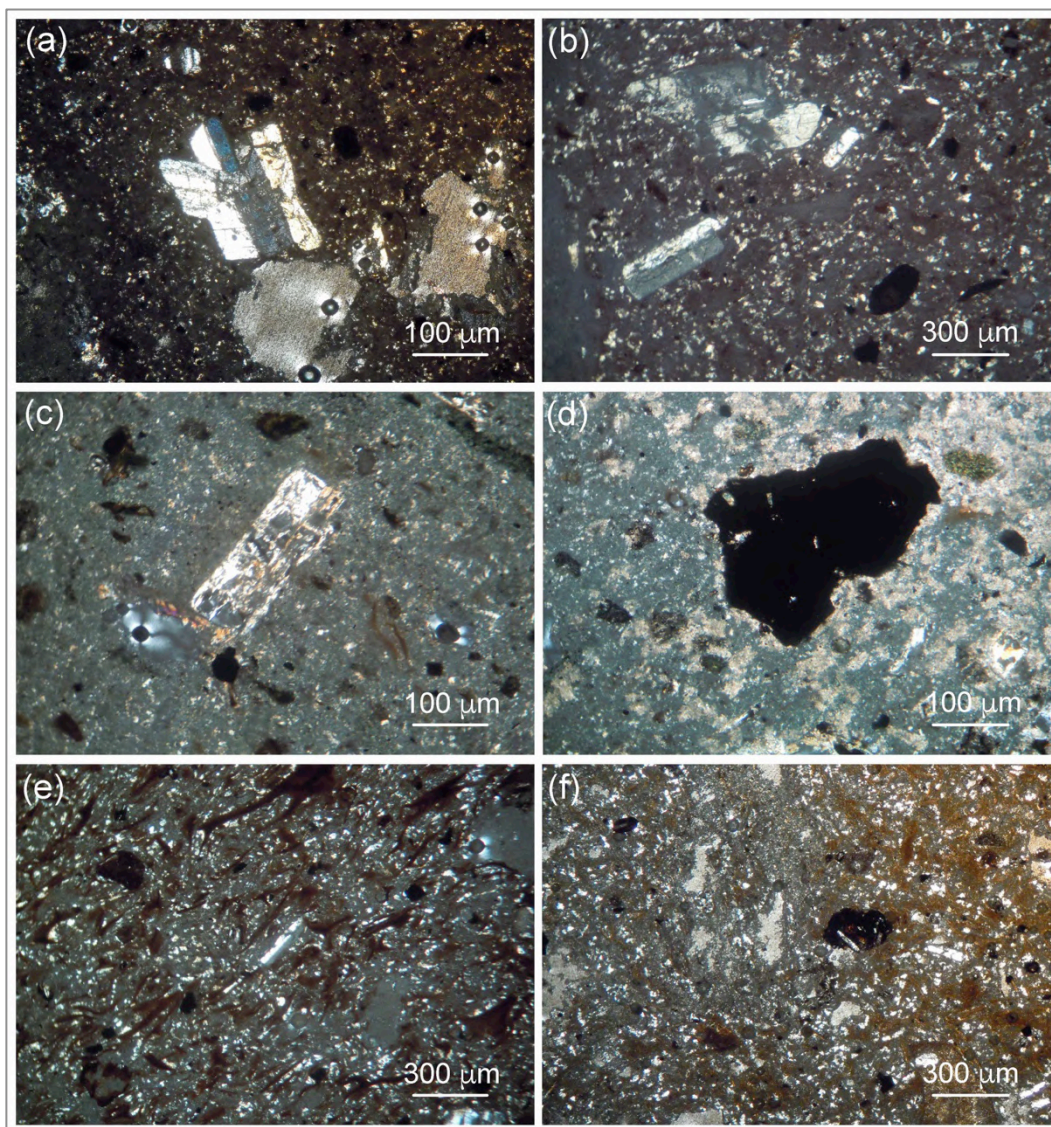


Figura 10.1.2: Caratteristiche microscopiche delle ignimbriti (rioliti/riodaciti) del sito di Forum Traiani: (a, b, c) cristalli di plagioclasio relitti in FT16 ed FT14, (d) frammento litico in FT28, (e) tessitura eutassitica in FTc21, (f) microliti sialici in pasta di fondo su FTc22.

L'estrazione dell'ignimbrite per la realizzazione delle strutture del sito di Forum Traiani è avvenuta, nella gran parte, dall'affioramento posto nel lato Sud del sito archeologico, a pochi metri dalle strutture abitative U (Fig. 5.5.1a, Capitolo 5). Le tracce di attività estrattiva sono rappresentate da almeno tre fronti di lavorazione. Su un pianoro di cava, solchi simili a tracce di ruote di carro, sembrano condurre a Sud-Ovest in direzione dell'Anfiteatro. È probabile che il materiale qui estratto potesse essere anche utilizzato per la costruzione di quest'ultimo e delle altre strutture del centro abitato adiacenti il sito archeologico.

L'affioramento in questione presenta una *facies* cromatica rossastra, rosata e grigia. Ignimbriti di questa colorazione rappresentano però soltanto parte del materiale utilizzato nella costruzione del sito. Ampie parti murarie degli edifici del complesso termale, quali ad esempio le murature del *Tepidarium* e del *Frigidarium* (sale *m* ed *n*), ed il porticato della *Natatio*, sono realizzati in

ignimbrite di *facies* con colorazioni dal verdastro al celeste chiaro. Tali *facies* cromatiche non sono presenti nell'affioramento a Sud del sito archeologico per cui è probabile che l'area estrattiva di queste ignimbriti si trovi ancora più a Sud delle terme, presso affioramenti sfruttati storicamente sotto il profilo estrattivo. In tali affioramenti sono ancora oggi presenti alcune cave, in parte attive, d'ignimbrite con colorazione verde-celeste, ad esempio: la cava di proprietà Piras localizzata a 1,4 Km a S-E rispetto al sito archeologico.

10.1.2 Malte

Le malte sono caratterizzate da un colore variabile da grigio CILAB 70*-1*6 al biancastro in CIELAB 76*0*-2 (Fig. 10.1.2.1).

In alcuni campioni d'intonachino sono presenti tracce di dipinti murali di colorazione rossa (CIELAB 60*32*9, Fig. 10.1.2.1f), arancione (CIELAB 55*8*26, Fig. 10.1.2.1g) e nera (CIELAB 13*5*-2). Indagini sulla composizione mineralogica dei pigmenti utilizzati nelle pitture sono mostrate nel Paragrafo 10.7.

In sezione sottile si rileva un legante mediamente coeso in cui è frequente la presenza di grumi di calce sino a 4-6% vol. Il legante è prettamente carbonatico, interessato da fratturazioni di ritiro con apertura media di 10 µm e spaziature di 750 µm. Come riportato in Tab. 10.1.2.1, l'aggregato è rappresentato da litoclasti, *Cocciopesto*, bioclasti (e.g., bivalvi, echinidi, alghe coralline), cristallo-clasti sialici (e.g., quarzo, K-feldspato, plagioclasio), mafici (e.g., opachi, muscovite) e carbone. I litoclasti sono rappresentati da frammenti d'ignimbriti locali, granitoidi, liditi e raro marmo (Fig. 10.1.2.2e).

Malta	Funzione	Litoclasti	<i>Cocciopesto</i>	Bioclasti	Cristallo-clasti sialici	Cristallo-clasti mafici	Carbone
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
FT24		13,4	62,8	0,0	23,7	0,0	0,1
FT25		2,8	89,1	0,0	8,1	0,0	0,0
FT26		87,0	3,1	0,0	9,3	0,0	0,2
FT27		73,0	18,8	0,0	7,5	0,0	0,1
FT29	Calcestruzzo pavimentale	69,0	22,5	0,0	7,7	0,1	0,1
FT30		7,2	75,5	0,0	17,1	0,1	0,1
FT31a		68,4	22,6	0,0	8,8	0,1	0,1
FT32a		12,7	73,9	0,0	13,4	0,0	0,0
FT34		9,9	73,8	0,1	16,2	0,0	0,0
FT51		10,8	81,1	0,0	7,9	0,2	0,0
FT31b	Allettamento del mosaico	54,5	20,9	0,0	24,4	0,0	0,2
FT32b		14,5	65,4	0,0	20,1	0,0	0,0
FT33		66,8	23,8	0,0	9,4	0,0	0,0
FT60	Allettamento conci/laterizi	3,4	31,4	0,0	63,8	1,4	0,0
FT61		5,9	35,6	0,0	56,0	2,3	0,2
FT62		1,4	27,3	0,0	71,1	0,2	0,0
FT48p		30,0	50,2	0,0	19,8	0,0	0,0
FT49p		29,1	59,6	0,0	11,1	0,2	0,0
FT50		0,8	94,4	0,0	4,7	0,1	0,0
FT52s		8,2	85,8	0,0	6,0	0,0	0,0
FT53s	<i>Trullissatio</i>	35,8	58,9	0,0	5,1	0,1	0,1
FT56a'		5,3	81,9	0,0	12,7	0,1	0,0
FT56a''		6,4	81,5	0,0	12,1	0,0	0,0
FT58a'		2,7	80,6	0,0	16,6	0,1	0,0
FT58a''		4,4	78,3	0,0	17,3	0,0	0,0

Tabella 10.1.2.1: Distribuzione dei vari componenti degli aggregati presenti nelle malte del sito di Forum Traiani espresse in percentuale su totale aggregato.

Dieci campioni di calcestruzzi pavimentali mostrano un aggregato composto da *Cocciopesto* in percentuali variabili da circa il 3% a 89% con una media del 52%. Il materiale presenta bordi definiti e spigoli vivi con dimensioni variabili da < 1 mm a 7 mm e circolarità piuttosto basse ($C < 0,3$). In alcuni campioni di *Cocciopesto* sono visibili bordi di reazione chimica con il legante carbonatico. In tale gruppo sono frequenti i litoclasti con una media del 36%, rappresentati da aggregati con dimensioni fino a 8 mm e forme sub-arrotondate. Nei calcestruzzi si rileva mediamente il 12% di cristallo-clasti sialici e solo raramente i cristallo-clasti mafici (Tab. 10.1.2.1). Di norma i cristallo-clasti presentano dimensioni frequentemente inferiori a 1 mm con forme ben arrotondate ($C > 0,6$).

Malta	Funzione	Litoclasti	<i>Cocciopesto</i>	Bioclasti	Cristallo-clasti sialici	Cristallo-clasti mafici	Carbone
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
FT37a		49,5	0,0	0,0	50,4	0,0	0,1
FT38a		59,8	0,0	0,1	40,1	0,0	0,0
FT39a		59,8	0,0	0,0	40,2	0,0	0,0
FT40a		63,7	0,0	0,0	36,2	0,1	0,0
FT41a		60,1	0,0	0,0	39,9	0,0	0,0
FT42p	Arriccio	71,2	0,0	0,0	28,5	0,2	0,1
FT44p		57,3	0,0	0,0	42,7	0,0	0,0
FT46p		57,4	0,0	0,0	42,5	0,1	0,0
FT54s		65,1	0,0	0,0	34,5	0,2	0,2
FT56b'		5,8	0,0	0,0	94,2	0,0	0,0
FT56b''		3,6	0,0	0,0	96,2	0,2	0,0
FT58b'		2,9	0,0	0,0	97,1	0,0	0,0
FT58b''		3,7	0,0	0,0	96,3	0,0	0,0
FT37b		2,1	0,0	0,2	97,6	0,1	0,0
FT38b		2,4	0,0	0,0	97,5	0,1	0,0
FT39b		4,8	0,0	0,0	95,0	0,2	0,0
FT40b	Intonachino	4,5	0,0	0,0	95,4	0,1	0,0
FT41b		5,1	0,0	0,0	94,8	0,0	0,1
FT43p		8,8	0,0	0,0	91,2	0,0	0,0
FT45p		7,5	0,0	0,0	92,5	0,0	0,0
FT47p		30,0	0,0	0,0	70,0	0,0	0,0
FT55s		0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0

Tabella 10.1.2.1: Distribuzione dei vari componenti degli aggregati presenti nelle malte del sito di Forum Traiani espresse in percentuale su totale aggregato.

Le malte di allettamento dei mosaici consistono in due campioni con aggregato principalmente rappresentato da *Cocciopesto* e secondariamente da litoclasti. I minerali mafici ed i bioclasti sono assenti, mentre si rileva la presenza di carbone in FT31b.

Nelle malte di allettamento di conci/laterizi è presente circa il 29% di aggregato di *Cocciopesto* con dimensioni variabili da < 1 mm a 6 mm, spigoli vivi ($C < 0,2$) e bordi di reazione col legante. Un'ampia porzione di aggregato consiste di cristallo-clasti sialici con dimensioni sotto 1 mm. I cristalli mafici, in percentuali medie sotto l'1% su totale aggregato, sono sempre rappresentati da muscovite ed opachi (Tab. 10.1.2.1).

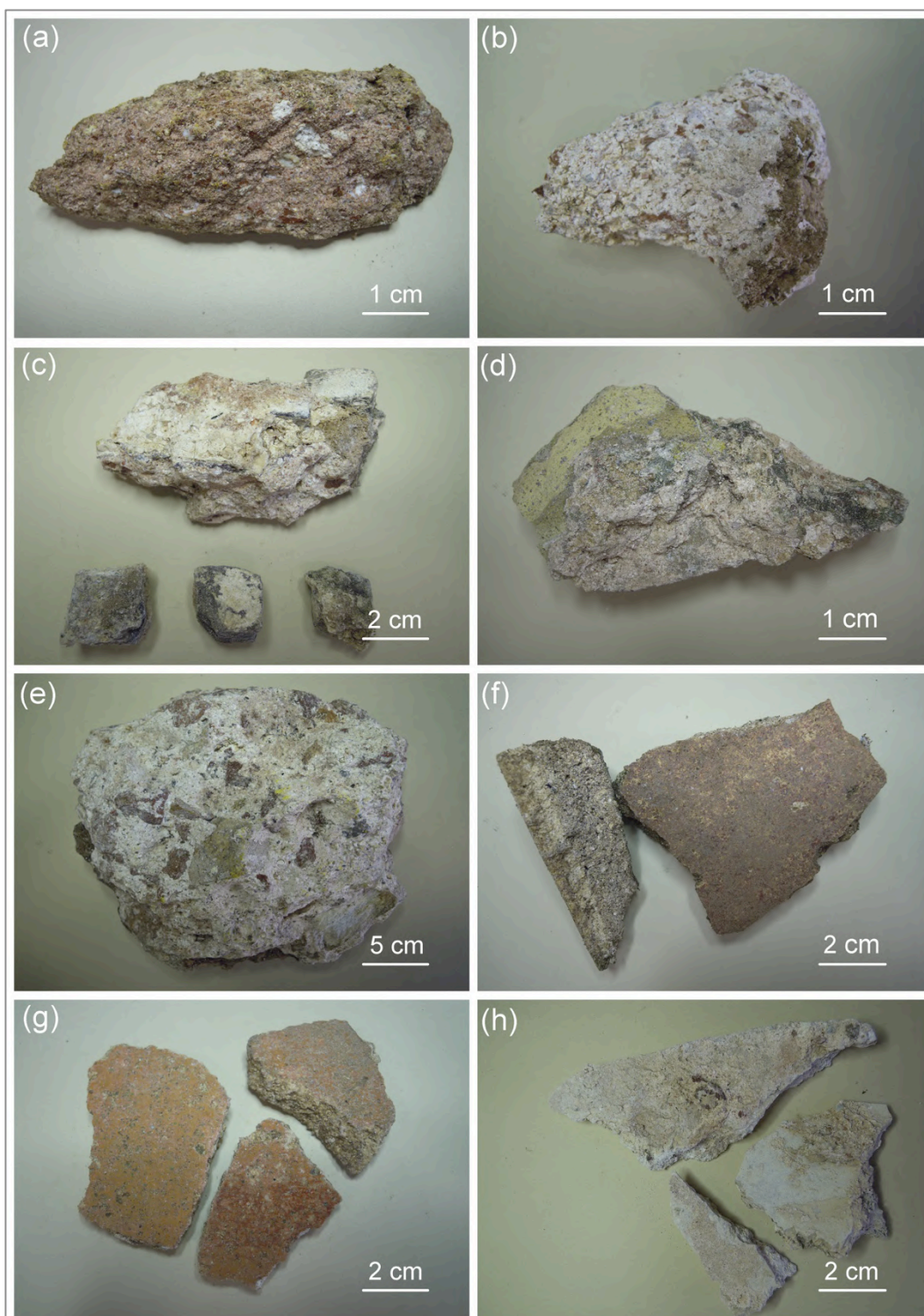


Figura 10.1.2.1: Caratteristiche macroscopiche delle malte del sito di Forum Traiani: (a) calcestruzzo pavimentale FT26, (b) malta di allettamento del mosaico FT31b, (c) malta di allettamento del mosaico e tessere FT32b, (d) malta di allettamento dei conci/laterizi FT33, (e) *Trullissatio* FT50, (f) arriccio ed intonachino affrescato a contatto, campioni FT38a, FT38b, (g) intonachino affrescato FT39b, (h) intonachino FT45p.

I litoclasti sono presenti con una media di circa 19%, valore enfatizzato dalla presenza di un campione (FT33) con una percentuale piuttosto alta pari a 67%.

Valori estremamente differenti di contenuto in litoclasti all'interno di ogni gruppo sembrano essere frequenti. Questa variabilità è inoltre rilevata nel gruppo dei *Trullissatio* in percentuali da 0,8 a 36%

con media del 14%. Queste differenze sono attribuibili al fatto che i campioni provengono da differenti sale dell'edificio e/o differenti serie stratigrafiche di malte come si vedrà in seguito. Nei *Trullissatio* appare inoltre variabile la percentuale di cristallo-clasti ialici da un minimo del 4% ad un massimo del 20%.

Nei campioni di ariccio l'aggregato consiste principalmente di cristallo-clasti ialici di dimensioni sempre submillimetriche (con una media di 57%) e litoclasti (media di 43%). Il restante aggregato è rappresentato da rari frammenti di carbone e minerali femici. Il *Cocciopesto* è assente.

Nei campioni d'intonachino gli aggregati hanno percentuali differenti rispetto ai campioni di ariccio. I litoclasti, infatti, rappresentano circa il 7% sul totale, mentre una grossa porzione di aggregato consiste di cristallo-clasti (Tab. 10.1.2.1). Il *Cocciopesto* è assente ed il carbone è presente solo nel campione FT41b.

La caratterizzazione OM indica che le materie prime impiegate per la produzione delle malte, come solitamente avviene nel caso di monumenti Romani, provengono da zone limitrofe al sito.

Lo studio in sezione sottile delle malte ha permesso di risalire alla provenienza di cristallo-clasti e dei litoclasti e di individuare almeno due aree di estrazione. La prima area di estrazione, situata in ambiente fluviale, è testimoniata dalla presenza di frammenti d'ignimbriti locali ad alta circolarità, probabilmente sabbie estratte dal letto del vicino fiume Tirso. L'analisi dei bioclasti dimostra come siano presenti specie prettamente marine come le alghe coralline e gli echinidi, indicando che parte dell'aggregato di cristallo-clasti (Fig. 10.1.2.2h) proviene appunto da un ambiente marino.

Il *Cocciopesto* utilizzato nelle malte dei calcestruzzi, malte di allettamento e negli strati d'intonaco dei *Trullissatio*, mostra, all'interno della sua matrice, quantità variabili di quarzo (come smagrante) utilizzato per prevenire il ritiro dell'argilla durante le fasi di cottura. L'analisi d'immagine dimostra che la quantità di quarzo internamente ai frammenti di *Cocciopesto* è variabile dal 1 al 23% vol., con distribuzioni granulometriche da uniformi a molto varie (Fig. 10.1.2.2a, b, c, d).

In Fig. 10.1.2.2c si nota inoltre una disposizione debolmente allineata dei frammenti di quarzo, a dimostrazione che il *Cocciopesto* possa quindi derivare da semplici laterizi macinati o da materiali ceramici finemente lavorati e sottoposti a processi di tornitura (e.g., ceramiche artistiche).

Un frammento di carbone del diametro di 500 μm , rinvenuto nel campione TH37a (Fig. 10.1.2.2g), mostra la presenza di raggi pluriseriati e uniseriati nella sezione tangenziale tipica del legno di quercia (*Quercus sp.*), specie endemica ancora presente nella campagna dell'area di Fordongianus e del sito di Forum Traiani.

Non è chiaro se il carbone sia stato inglobato accidentalmente durante la cottura del calcare di produzione o rappresenti un'aggiunta voluta. A questo proposito, le proprietà impermeabilizzanti della polvere di carbone nelle malte erano già note al tempo di Vitruvio (Wetmore et al. 2010; Cagnana 2000). Queste raccomandazioni, tramandate nel Medioevo, furono in seguito riprese da

Oliver (2006) che raccomandava l'uso della polvere di carbone di quercia per creare uno strato impermeabilizzante.

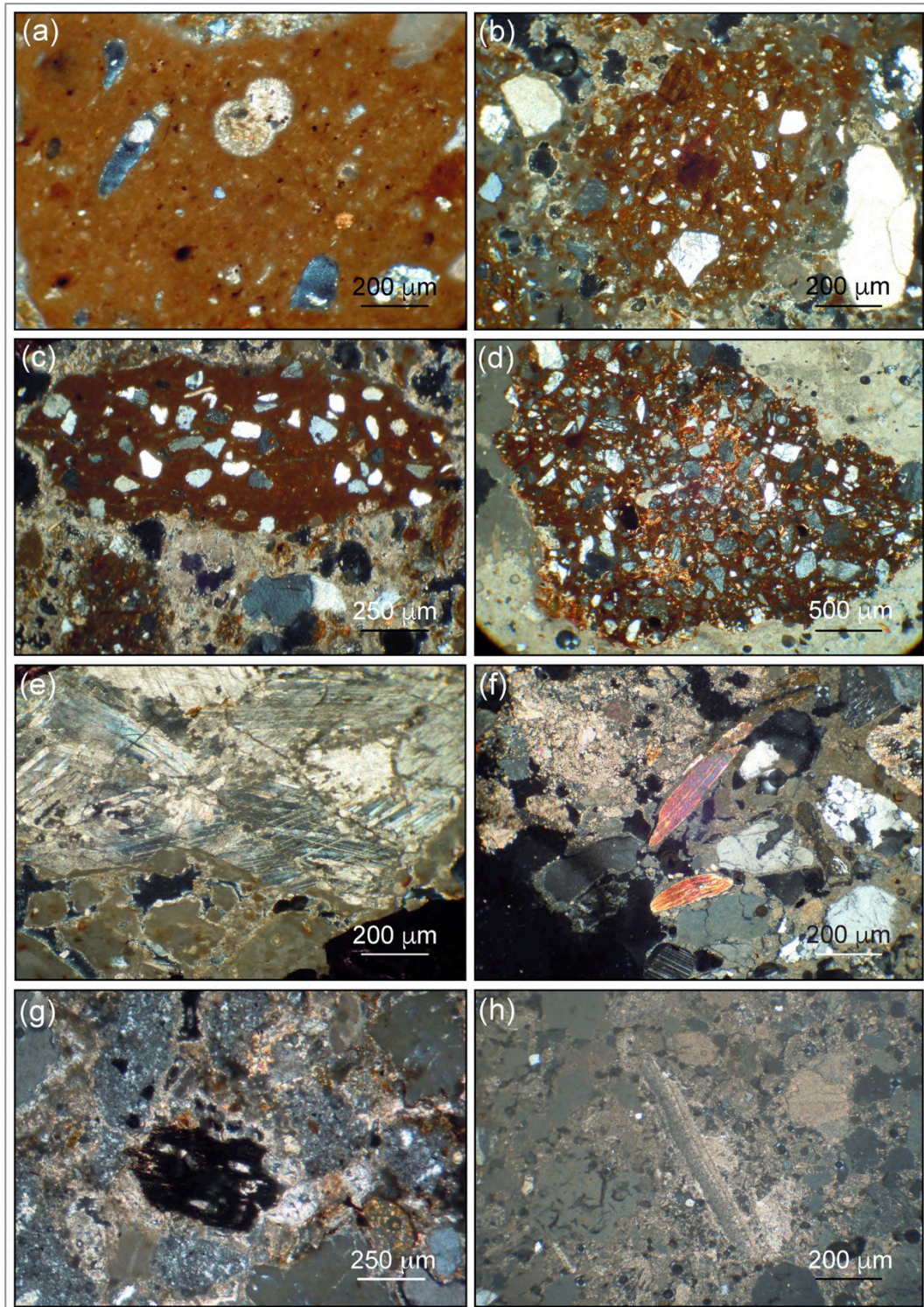


Figura 10.1.2.2. Caratteristiche microscopiche delle malte del sito di Forum Traiani: (a) *Cocciopesto* con $\approx 1\%$ vol. di smagranze (FT58a''), (b) *Cocciopesto* con $\approx 14\%$ vol. di smagranze a granulometria varia (FT56a'), (c) *Cocciopesto* con $\approx 15\%$ vol. di smagranze a granulometria uniforme (FT56a'), (d) *Cocciopesto* with $\approx 23\%$ vol. di smagranze a granulometria molto varia, (e) frammento di marmo (FT49p), (f) Cristallo-clasti di quarzo, plagioclasio, K-feldspato e muscovite (FT39a), (g) frammento di carbone in FT37a, (h) bioclasto nell'intonachino FT37b.

10.2 Proprietà fisico-meccaniche delle rocce

Le ignimbriti del sito di Forum Traiani, come mostrato nelle Tab. 10.2.1, 10.2.2, 10.2.3, presentano valori delle proprietà fisiche con deviazioni standard piuttosto basse ad indicare una buona omogeneità petro-fisica del materiale. Non si rilevano particolari differenze nelle proprietà fisiche sulla base della variabilità della colorazione macroscopica delle rocce che, come detto in precedenza, è presente anche nei campioni di affioramento.

Campione	Litologia	Densità reale	Densità apparente	Densità solido	Coefficiente Imbibizione	Porosità aperta all'elio	Porosità aperta all'acqua	Porosità chiusa	Porosità totale	Indice dei vuoti	Indice di saturazione
		ρ_R (g/cm ³)	ρ_B (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	CI_w (%)	Φ_{He} (%)	Φ_{H_2O} (%)	Φ_c (%)	Φ_t (%)	e ()	S.I. (%)
FT1	Ignimbriti del monumento	2,58	1,61	2,61	21,27	37,40	34,33	1,39	38,79	0,63	91,79
FT2		2,48	1,58	2,54	17,97	36,15	28,43	2,63	38,78	0,62	78,65
FT3		2,56	1,67	2,58	19,28	34,81	32,18	0,87	35,68	0,55	92,45
FT4		2,56	1,64	2,60	16,89	36,04	27,62	1,67	37,71	0,60	76,63
FT5		2,61	1,67	2,65	18,73	36,01	31,29	1,53	37,54	0,60	86,90
FT6		2,52	1,56	2,57	23,94	38,27	37,31	1,65	39,91	0,66	97,50
FT7		2,64	1,63	2,66	20,32	38,30	33,09	0,65	38,95	0,64	86,40
FT8		2,55	1,61	2,61	18,88	36,94	30,32	2,55	39,48	0,64	82,10
FT9		2,58	1,61	2,65	19,34	37,85	31,06	2,51	40,36	0,67	82,05
FT11		2,58	1,72	2,66	15,18	33,12	26,19	3,04	36,16	0,56	79,08
FT12		2,59	1,72	2,65	16,39	33,68	28,13	2,52	36,20	0,56	83,52
FT13		2,57	1,69	2,62	17,52	34,40	29,57	1,67	36,07	0,56	85,96
FT14		2,38	1,63	2,45	16,14	31,28	26,36	3,11	34,38	0,52	84,28
FT15		2,52	1,62	2,53	21,06	35,63	34,12	0,58	36,21	0,57	95,77
FT16		2,59	1,62	2,64	22,56	37,63	36,52	1,72	39,35	0,64	97,03
FT17		2,39	1,58	2,42	19,00	33,90	29,99	1,19	35,08	0,54	88,46
FT28		2,44	1,56	2,46	20,85	35,85	32,58	1,00	36,85	0,58	90,90
Media aritmetica			2,54	1,63	2,58	19,14	35,72	31,12	1,78	37,50	0,60
Deviazione standard		0,08	0,05	0,08	2,36	1,98	3,29	0,81	1,82	0,05	6,46
FTc18	Ignimbriti di affioramento	2,49	1,60	2,52	18,50	35,88	29,55	1,41	37,29	0,59	82,36
FTc19		2,50	1,58	2,53	19,57	36,69	30,98	1,34	38,02	0,61	84,46
FTc20		2,59	1,59	2,64	21,45	38,89	34,01	1,92	40,81	0,68	87,45
FTc21		2,60	1,63	2,67	19,77	37,35	32,20	2,83	40,18	0,66	86,21
FTc22		2,65	1,65	2,68	22,38	37,62	37,04	0,97	38,59	0,62	98,43
FTc23		2,59	1,74	2,60	15,08	33,00	26,21	0,18	33,18	0,50	79,43
Media aritmetica			2,57	1,63	2,61	19,46	36,57	31,67	1,44	38,01	0,61
Deviazione standard		0,06	0,06	0,07	2,56	2,02	3,72	0,89	2,71	0,06	6,55

Tabella 10.2.1: Proprietà fisiche delle ignimbriti del monumento e della cava storica.

La densità reale media è $2,54 \pm 0,08$ g/cm³ per i materiali monumentali e $2,57 \pm 0,06$ g/cm³ per i materiali di affioramento. La densità apparente è invece compresa fra un minimo di 1,56 g/cm³ e 1,72 con media di $1,63 \pm 0,05$ g/cm³ nei campioni monumentali, e fra un minimo di 1,58 g/cm³ e 1,74 con media di $1,63 \pm 0,06$ g/cm³ nei campioni di affioramento (Tab. 10.2.1, Fig. 10.2.1a, b).

Campione	Litologia	Assorbimento (%)								
		8,64 e10 ⁴ s	17,28 e10 ⁴ s	25,92 e10 ⁴ s	34,56 e10 ⁴ s	43,20 e10 ⁴ s	51,84 e10 ⁴ s	60,48 e10 ⁴ s	69,12 e10 ⁴ s	77,76 e10 ⁴ s
FT1	Ignimbriti del monumento	16,50	20,09	20,82	21,00	21,08	21,17	21,23	21,25	21,27
FT2		14,24	17,14	17,49	17,62	17,61	17,91	17,88	17,94	17,97
FT3		14,90	17,86	18,43	18,38	18,58	18,88	19,08	19,25	19,28
FT4		13,42	15,91	16,41	16,62	16,68	16,75	16,79	16,84	16,89
FT5		15,01	18,28	18,24	18,30	18,60	18,50	18,64	18,67	18,73
FT6		17,61	21,92	22,76	23,00	23,41	23,58	23,84	23,86	23,94
FT7		16,12	19,47	19,82	20,01	20,11	20,17	20,21	20,29	20,32
FT8		14,98	18,09	18,39	18,45	18,50	18,52	18,76	18,85	18,88
FT9		13,52	18,27	18,83	19,12	19,23	19,25	19,29	19,31	19,34
FT11		12,35	14,53	14,76	14,90	15,02	15,06	15,09	15,14	15,18
FT12		12,37	15,86	16,05	16,22	16,28	16,30	16,36	16,36	16,39
FT13		13,84	17,13	17,40	17,55	17,55	17,63	17,69	17,72	17,52
FT14		12,68	14,80	15,17	15,45	15,47	15,89	16,06	16,12	16,14
FT15		16,36	19,87	20,39	20,55	20,77	20,88	20,94	21,01	21,06
FT16		17,20	21,72	22,12	22,46	22,36	22,45	22,49	22,53	22,56
FT17		15,05	18,15	18,50	18,59	18,80	18,86	18,91	18,98	19,00
FT28		15,84	19,59	19,93	20,35	20,64	20,75	20,83	20,85	20,85
FTc18		Ignimbriti di affioramento	14,34	17,28	17,84	18,23	18,39	18,41	18,44	18,47
FTc19	15,13		18,79	19,15	19,33	19,47	19,49	19,51	19,54	19,57
FTc20	12,80		16,29	16,73	17,08	17,62	17,94	18,16	18,26	18,29
FTc21	15,38		18,54	18,89	19,13	19,21	19,47	19,71	19,76	19,77
FTc22	17,00		20,75	21,13	21,66	22,20	22,27	22,29	22,32	22,38
FTc23	11,93		14,22	14,58	14,71	14,90	14,93	14,99	15,04	15,08

Tabella 10.2.2: Assorbimenti per immersione totale in acqua nelle ignimbriti del sito di Forum Traiani e della cava storica.

Campione	Litologia	Resistenza a	Resistenza a	Resistenza a
		punzonamento	compressione	trazione
		I _{S50}	R _c	R _t
		(MPa)	(MPa)	(MPa)
FT1		1,48	20,71	1,85
FT2		1,03	14,37	1,28
FT3		1,12	15,74	1,41
FT4		1,64	23,00	2,05
FT5		0,93	12,98	1,16
FT6		1,02	14,33	1,28
FT7		1,41	19,70	1,76
FT8		1,08	15,08	1,35
FT9	Ignimbriti del monumento	1,01	14,07	1,26
FT11		1,35	18,88	1,69
FT12		1,05	14,70	1,31
FT13		0,99	13,84	1,24
FT14		2,22	31,05	2,77
FT15		1,43	19,98	1,78
FT16		0,96	13,46	1,20
FT17		1,01	14,20	1,27
FT28		1,11	15,60	1,39
Media aritmetica		1,23	17,16	1,53
Deviazione standard		0,33	4,66	0,42
FTc18		1,66	23,20	2,07
FTc19		1,57	22,02	1,97
FTc20	Ignimbriti di affioramento	3,72	59,45	4,64
FTc21		1,83	25,63	2,29
FTc22		1,77	24,73	2,21
FTc23		4,77	76,40	5,97
Media aritmetica			2,55	38,57
Deviazione standard		1,36	23,39	1,69

Tabella 10.2.3: Caratteristiche meccaniche delle rocce del sito di Forum Traiani.

La densità del solido rispecchia la paragenesi della roccia con valori compresi fra 2,42 e 2,66 g/cm³ con media di 2,58 ± 0,08 g/cm³ nei campioni monumentali e fra 2,52 e 2,68 g/cm³ con media di 2,61 ± 0,07 g/cm³ nei campioni di affioramento (Tab. 10.2.1).

Le ignimbriti presentano, infatti, indici di porfiricità (5 < I.P. < 15%) per una paragenesi che consiste in minerali sialici come plagioclasio, K-feldspato (che hanno una densità di 2,68 e 2,52 g/cm³ rispettivamente), rara biotite (con una densità variabile tra 2,82 e 3,2 g/cm³) e abbondante vetro in pasta di fondo (con densità variabili tra 2,2 e 2,5 g/cm³).

La differenza fra densità del solido dei campioni monumentali e quelli di affioramento, seppur minima, sembra dovuta a più estesi processi di devettrificazione nelle rocce di affioramento che portano alla formazione di minerali secondari come celadonite e glauconite (che hanno una densità (ρ_s) di circa 3 g/cm³).

La porosità aperta all'elio è pari a 35,7 ± 1,98% nei campioni di monumento e 36,6 ± 2,02% in quelli di affioramento (Fig. 10.2.1c). Dalla Tab. 10.2.1 e dalla Fig. 10.2.1d, si nota come nelle ignimbriti del monumento la porosità chiusa rappresenti in media circa il 5% della porosità totale,

mentre la porosità aperta rappresenta in media il 95%. I campioni di affioramento mostrano dati simili con la porosità chiusa che rappresenta il 3,7% della porosità totale mentre, la porosità aperta rappresenta il 96,3%.

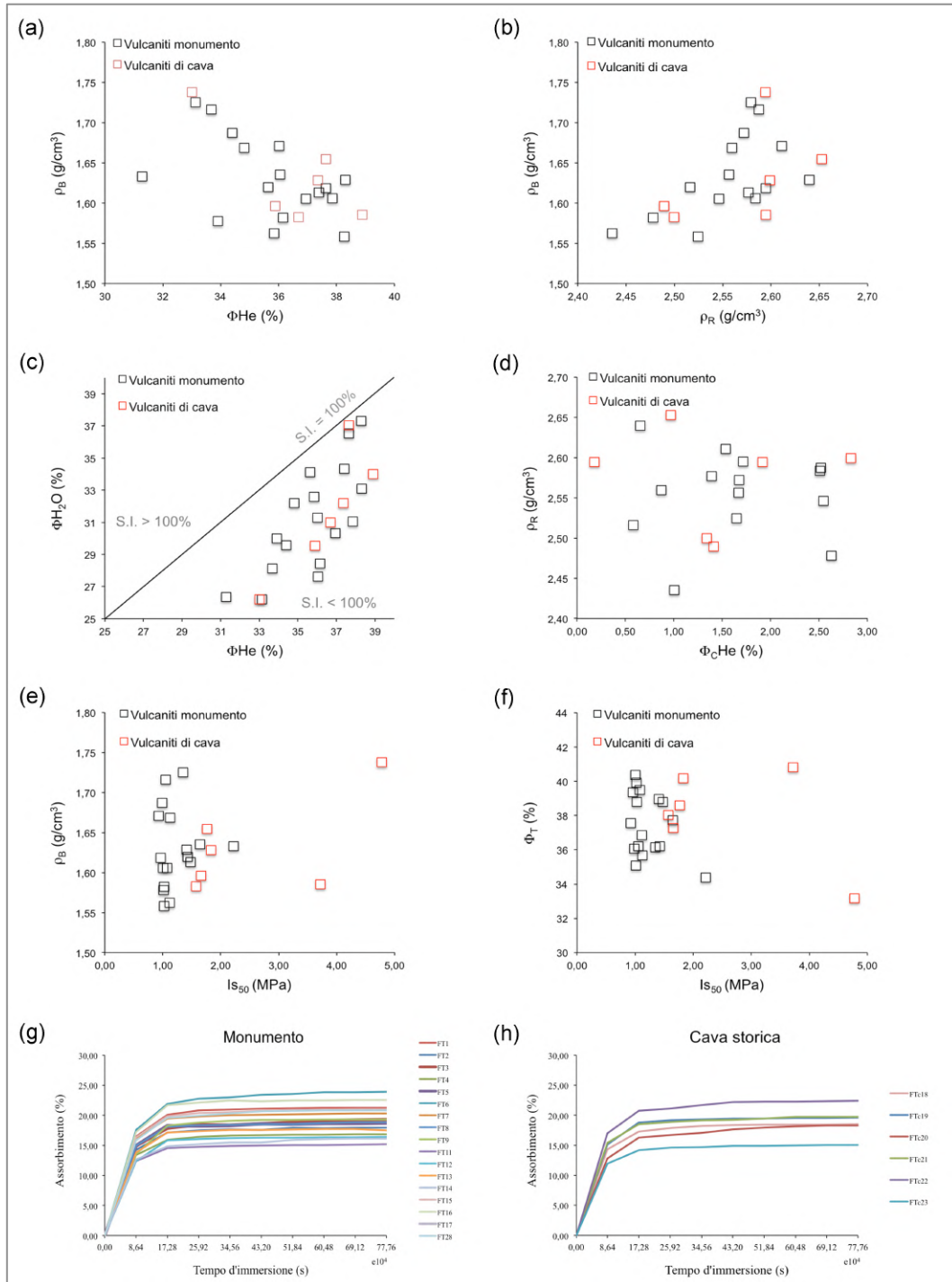


Figura 10.2.1.1 Caratterizzazioni fisiche sulle ignimbriti: (a) porosità aperta all'elio vs densità apparente, (b) densità reale vs densità apparente, (c) porosità aperta all'elio vs porosità aperta all'acqua, (d) porosità chiusa vs densità reale, (e) indice di resistenza a punzonamento vs densità apparente, (f) indice di resistenza a punzonamento vs porosità totale, (g) curva di assorbimento per immersione totale delle ignimbriti monumentali, (h) curva di assorbimento per immersione totale delle ignimbriti di cava.

I campioni evidenziano un coefficiente d'imbibizione molto simile nelle rocce monumentali e in quelle di affioramento con valori rispettivamente di 19,1 e 19,5%. In Tab. 10.2.3, la prova di assorbimento per immersione totale mostra come la saturazione si completi al 98% già il secondo giorno di prova mentre la curva presenta una stabilizzazione intorno al quarto giorno (Fig. 10.2.1g, h).

Anche l'indice di saturazione dei campioni di cava e di affioramento è molto simile. Differenti sono invece gli indici di resistenza a punzonamento e le correlate resistenze a compressione e trazione (Fig. 10.2.1e, f), parametri influenzati in questo caso da un differente grado di alterazione fisica ed anche da un probabile diverso grado originario di saldatura dall'ignimbrite di affioramento rispetto alle ignimbriti del monumento.

Nella Tab. 10.2.1 si rileva che l'indice di resistenza al punzonamento (I_{S50}) ha un valore di $1,23 \pm 0,33$ MPa nei conci di pietra monumentali e $2,55 \pm 1,36$ MPa nei campioni della cava storica. La maggiore compattezza dei campioni di affioramento rispetto a quelli monumentali maggiormente degradati era già emersa durante il campionamento in particolare per i campioni FTc20 ed FTc23.

10.3 Caratteristiche granulometriche dell'aggregato mediante setaccio (PSD)

La dissoluzione del legante carbonatico ha permesso di rilevare il rapporto L/A di ciascuna malta campionata come da Tab. 10.3.1.

Si nota una proporzionalità inversa tra spessore delle gettate e rapporto L/A.

Ciò è ad esempio visibile nei calcestruzzi pavimentali, considerate le gettate più spesse con $10 < s < 20$ cm che mostrano un rapporto L/A medio pari a 0,38. Nei *Trullissatio* il rapporto L/A medio è di 0,48, variabile da 0,20 a 1,75.

In gettate con spessori più modesti, come le malte di allettamento dei mosaici e conci/laterizi, si rileva un rapporto L/A medio di 0,97 e 0,85 rispettivamente. In gettate con spessori centimetrici come arricci ed intonachini, i rapporti L/A sono i più elevati. Gli arricci mostrano un L/A minimo di 0,26 con massimi di 1,30 e medie di 0,70. Negli intonachini, composti per la quasi totalità da calce, i rapporti L/A sono più elevati, con minimi di 2,2 e massimi di 18,9. La media è 5,05 ma è fortemente condizionata dalla presenza del campione FT55s (L/A = 18,9), senza il quale sarebbe 3,32 (Tab. 10.3.1). Le caratteristiche dei fusi granulometrici sono riportate in Tab. 10.3.1, 10.3.2, 10.3.3.

Nei calcestruzzi pavimentali, granulometrie da varie a molto varie caratterizzano i materiali con coefficienti di uniformità $8,06 < U < 23,33$. In queste malte l'aggregato è trattenuto prevalentemente ai setacci di 8, 4 e 2 mm (Fig. 10.3.1a, b, c, d).

Granulometrie estese si rilevano anche nelle malte di allettamento dei mosaici con $U = 16$ in FT31b e $U = 13,63$ in FT32b. Entrambi i campioni mostrano curve granulometriche simili con moda centrata sui setacci di 4000-2000 μm (Fig. 10.3.1e, f).

Nelle malte di allettamento dei laterizi, come da Tab. 10.3.1, 10.3.2, si notano delle somiglianze dei fusi granulometrici nei campioni FT33 e FT60 caratterizzati da un trattenuto centrato ai 4 mm con percentuali simili di trattenuto ai setacci di 8 e 2 mm. In quest'ultimo gruppo i coefficienti di uniformità hanno valori $9,33 < U < 17,14$ e sono sufficientemente alti per definire le granulometrie come varie e molto varie (Tab. 10.3.3).

Il gruppo dei *Trullissatio* è caratterizzato da granulometrie di tipo vario e molto vario con $8,26 < U < 20$. I fusi granulometrici hanno caratteristiche molto diverse fra loro. In FT48p, FT49p FT52s e FT58a'', il trattenuto massimo è centrato sui setacci di 4000-2000 μm evidenziando un aggregato di tipo prevalentemente ghiaioso molto fine (granule, Wentworth 1922). In FT50 (Fig. 10.3.2a, b) e FT58a' l'aggregato, più fine è centrato a 1000-2000 μm e 2000-1000 μm rispettivamente. Nei rimanenti campioni FT56a' e FT56a'' un trattenuto centrato a 4000-500 μm presenta un marcato trend bimodale con lacuna granulometrica nei setacci intermedi (Fig. 10.3.2c, d).

Campione	Funzione	L/A	Trattenuto al setaccio (%)								
			8000µm	4000µm	2000µm	1000µm	500µm	250µm	125µm	63µm	<63µm
FT24		0,37	35,92	25,58	13,61	5,50	4,63	6,45	3,97	2,18	2,18
FT25		0,38	36,19	22,74	9,61	8,44	7,85	7,64	5,22	3,20	1,12
FT26		0,39	4,02	30,55	17,88	15,11	11,29	8,96	6,68	3,51	2,01
FT27		0,41	21,57	15,10	18,99	16,87	10,57	7,27	3,58	2,59	3,45
FT29	Calcestruzzo pavimentale	0,33	18,66	36,47	18,37	7,66	4,38	6,74	3,48	2,54	1,70
FT30		0,37	22,03	19,13	14,78	12,17	10,14	7,83	7,25	4,06	2,61
FT31a		0,44	16,91	30,70	19,13	12,50	7,79	6,16	3,25	1,78	1,78
FT32a		0,34	0,00	28,51	33,40	13,12	6,92	8,02	5,13	2,44	2,44
FT34		0,31	9,33	20,99	19,56	15,75	11,57	10,05	6,82	4,31	1,61
FT51		0,44	0,00	22,63	15,35	13,01	16,57	14,42	7,52	4,85	5,66
FT31b		Allettamento del mosaico	0,94	7,07	33,42	18,99	12,93	9,50	8,10	5,45	3,39
FT32b	0,99		6,46	33,29	14,57	13,08	12,42	8,77	5,30	4,47	1,66
FT33		0,85	17,20	34,40	15,88	10,19	7,72	7,87	3,66	1,76	1,32
FT60	Allettamento conci/laterizi	0,67	4,16	24,72	19,21	17,68	14,22	12,81	4,32	2,24	0,64
FT61		0,85	0,00	20,30	21,66	16,99	15,91	14,79	4,94	3,38	2,03
FT62		1,02	0,00	29,52	18,45	16,42	11,85	11,07	6,49	3,25	2,95
FT48p		1,75	15,61	35,32	18,89	6,65	9,45	6,45	3,53	1,64	2,46
FT49p		0,46	12,00	25,11	13,81	8,91	7,50	5,30	3,00	2,70	1,00
FT50		0,23	0,00	0,00	26,13	28,34	19,10	9,75	6,63	4,02	6,03
FT52s		0,23	0,00	26,43	27,13	15,37	11,48	8,94	5,08	3,48	2,09
FT53s	<i>Trullissatio</i>	0,66	0,00	0,00	23,90	12,91	19,92	17,29	11,63	6,37	7,97
FT56a'		0,20	4,64	32,48	12,06	13,09	16,24	11,00	4,92	2,78	2,78
FT56a''		0,25	4,42	30,93	11,49	11,93	15,47	14,01	6,45	2,65	2,65
FT58a'		0,31	0,00	5,61	31,78	24,30	18,69	8,41	5,61	3,74	1,87
FT58a''		0,20	5,01	35,09	20,05	11,13	10,53	6,37	4,31	3,01	3,01
FT37a			0,71	0,00	0,00	7,61	11,19	43,63	32,71	2,52	0,59
FT38a		0,73	0,00	0,00	7,76	11,44	38,55	35,11	4,29	1,03	1,81
FT39a		0,63	0,00	19,82	9,35	11,06	25,58	28,53	3,47	1,10	1,10
FT40a		0,76	0,00	23,74	11,43	6,24	25,05	24,48	4,66	1,76	2,64
FT41a		0,64	0,00	34,59	18,08	15,98	10,94	8,32	6,30	1,28	1,02
FT42p		0,72	0,00	14,96	7,84	10,01	29,39	32,36	3,31	1,07	1,07
FT44p	Arriccio	0,60	0,00	0,95	15,24	24,76	20,95	16,19	16,19	3,81	1,90
FT46p		0,78	0,00	0,00	9,05	8,99	24,71	49,33	4,94	1,19	1,79
FT54s		0,48	0,00	22,36	14,91	14,16	14,49	14,78	8,53	5,80	4,97
FT56b'		1,05	0,00	0,00	21,05	21,21	29,96	19,19	5,34	1,62	1,62
FT56b''		1,30	0,00	0,00	21,76	11,88	30,96	23,18	5,52	1,67	5,02
FT58b'		0,38	0,00	0,00	37,06	13,19	20,16	18,37	4,69	3,27	3,27
FT58b''		0,26	0,00	0,00	24,86	24,94	21,57	15,98	5,34	4,39	2,93

Tabella 10.3.1: Rapporto Legante/Aggregato e percentuale di trattenuto al relativo setaccio (continua).

Campione	Funzione	L/A	Trattenuto al setaccio (%)								
			8000 μm	4000 μm	2000 μm	1000 μm	500 μm	250 μm	125 μm	63 μm	<63 μm
FT37b		4,16	0,00	0,00	31,79	34,70	17,22	7,55	6,09	2,65	0,00
FT38b		5,16	0,00	0,00	28,28	36,55	15,17	9,66	6,21	3,45	0,69
FT39b		2,02	0,00	18,56	9,28	11,34	22,68	29,90	5,15	2,06	1,03
FT40b		2,30	0,00	13,56	13,25	12,13	21,30	27,52	6,12	4,08	2,04
FT41b	Intonachino	2,37	0,00	8,11	21,47	31,86	17,60	9,00	8,68	2,35	0,92
FT43p		4,39	0,00	0,00	0,00	9,79	10,27	67,49	3,99	6,04	2,42
FT45p		3,18	0,00	0,00	26,79	33,93	20,54	16,07	2,68	0,00	0,00
FT47p		2,94	0,00	0,00	24,00	32,00	24,00	16,00	4,00	0,00	0,00
FT55s		18,92	0,00	0,00	0,00	0,00	19,42	16,50	64,08	0,00	0,00

Tabella 10.3.1: Rapporto Legante/Aggregato e percentuale di trattenuto al relativo setaccio.

Campione	Funzione	Passante cumulativo (%)									
		8000 μm	4000 μm	2000 μm	1000 μm	500 μm	250 μm	125 μm	63 μm	<63 μm	
FT24		64,08	38,50	24,90	19,40	14,78	8,33	4,35	2,18	0,00	
FT25		63,81	41,07	31,47	25,03	17,18	9,54	4,32	1,12	0,00	
FT26		95,98	65,44	47,55	32,45	21,15	12,20	5,52	0,62	0,00	
FT27		78,08	64,38	45,21	28,77	17,81	9,59	4,11	0,23	0,00	
FT29		81,34	44,88	26,50	18,84	14,46	7,72	4,24	1,70	0,00	
FT30	Calcestruzzo pavimentale	77,97	58,84	44,06	31,88	21,74	13,91	6,67	0,42	0,00	
FT31a		83,09	52,39	33,26	20,76	12,97	6,81	3,56	1,78	0,00	
FT32a		100,00	71,49	38,09	24,97	18,04	10,02	4,89	2,44	0,00	
FT34		90,67	69,68	50,12	34,36	22,79	12,74	5,92	0,42	0,00	
FT51		100,00	77,37	62,02	49,01	32,44	18,02	10,51	5,66	0,00	
FT31b	Allettamento del mosaico	92,93	59,52	40,53	27,60	18,11	10,01	4,56	0,38	0,00	
FT32b		93,54	60,25	45,69	32,61	20,20	11,42	6,12	0,47	0,00	
FT33		82,80	48,40	32,52	22,34	14,62	6,75	3,09	1,32	0,00	
FT60	Allettamento conci/laterizi	95,84	71,12	51,91	34,23	20,01	7,20	2,88	0,64	0,00	
FT61		100,00	79,70	58,04	41,05	25,14	10,36	5,41	2,03	0,00	
FT62		100,00	70,48	52,03	35,61	23,76	12,69	6,20	2,95	0,00	

Tabella 10.3.2: Passanti cumulativi al relativo setaccio (continua).

Campione	Funzione	Passante cumulativo (%)									
		8000µm	4000µm	2000µm	1000µm	500µm	250µm	125µm	63µm	<63µm	
FT48p	<i>Trullissatio</i>	84,39	49,08	30,18	23,53	14,09	7,64	4,11	2,46	0,00	
FT49p		84,87	53,21	35,81	24,59	15,13	8,45	4,67	0,47	0,00	
FT50		100,00	100,00	73,87	45,53	26,43	16,68	10,05	6,03	0,00	
FT52s		100,00	73,57	46,43	31,06	19,58	10,64	5,57	2,09	0,00	
FT53s		100,00	100,00	76,10	63,19	43,27	25,98	14,34	7,97	0,00	
FT56a'		95,36	62,88	50,81	37,73	21,48	10,49	5,57	2,78	0,00	
FT56a''		95,58	64,65	53,16	41,23	25,76	11,75	5,30	2,65	0,00	
FT58a'		100,00	94,39	62,62	38,32	19,63	11,21	5,61	1,87	0,00	
FT58a''		94,99	59,90	39,85	28,72	18,20	11,83	7,52	4,51	1,50	
FT37a		<i>Arriccio</i>	100,00	100,00	92,39	81,20	37,57	4,86	2,34	1,76	0,00
FT38a	100,00		100,00	92,24	80,80	42,25	7,14	2,85	1,81	0,00	
FT39a	100,00		80,19	70,84	59,78	34,20	5,67	2,20	1,10	0,00	
FT40a	100,00		76,26	64,84	58,59	33,54	9,05	4,40	2,64	0,00	
FT41a	100,00		52,43	38,34	25,37	16,42	8,11	3,81	1,52	0,00	
FT42p	100,00		85,04	77,20	67,20	37,81	5,45	2,14	1,07	0,00	
FT44p	100,00		99,05	83,81	59,05	38,10	21,90	5,71	1,90	0,00	
FT46p	100,00		100,00	90,95	81,96	57,25	7,92	2,98	1,79	0,00	
FT54s	100,00		77,64	62,73	48,57	34,08	19,30	10,77	4,97	0,00	
FT56b'	100,00		100,00	78,95	57,73	27,77	8,58	3,24	1,62	0,00	
FT56b''	100,00		100,00	78,24	66,36	35,40	12,22	6,69	5,02	0,00	
FT58b'	100,00		100,00	62,94	49,75	29,59	11,23	6,54	3,27	0,00	
FT58b''	100,00		100,00	75,14	50,20	28,63	12,65	7,31	2,93	0,00	
FT37b	<i>Intonachino</i>		100,00	100,00	68,21	33,51	16,29	8,74	2,65	0,00	0,00
FT38b			100,00	100,00	71,72	35,17	20,00	10,34	4,14	0,05	0,00
FT39b		100,00	81,44	72,16	60,82	38,14	8,25	3,09	0,05	0,00	
FT40b		100,00	86,44	73,19	61,06	39,76	12,23	6,12	0,09	0,00	
FT41b		100,00	91,89	70,41	38,55	20,95	11,95	3,26	0,92	0,00	
FT43p		100,00	100,00	100,00	90,21	79,94	12,45	8,46	0,19	0,00	
FT45p		100,00	100,00	73,21	39,29	18,75	2,68	0,00	0,00	0,00	
FT47p		100,00	100,00	100,00	90,21	79,94	12,45	8,46	0,19	0,00	
FT55s		100,00	100,00	100,00	100,00	81,00	64,00	0,00	0,00	0,00	

Tabella 10.3.2: Passanti cumulativi al relativo setaccio.

Campione	Funzione	Diametro determinante al 60% D ₆₀ (µm)	Diametro determinante al 10% D ₁₀ (µm)	Coefficiente di uniformità U=D ₆₀ /D ₁₀	Tipo di granulometria
FT24		7000	300	23,33	molto varia
FT25		7000	250	28	molto varia
FT26		3400	200	17	molto varia
FT27		3300	250	13,2	varia
FT29	Calcestruzzo pavimentale	2500	310	8,06	varia
FT30		3500	310	11,29	varia
FT31a		5000	390	12,82	varia
FT32a		3000	250	12	varia
FT34		5500	300	18,33	molto varia
FT51		1900	120	15,83	molto varia
FT31b	Allettamento del mosaico	4000	250	16	molto varia
FT32b		3000	220	13,63	varia
FT33		5000	350	14,28	varia
FT60	Allettamento conci/laterizi	2800	300	9,33	varia
FT61		6000	350	17,14	molto varia
FT62		2900	200	14,5	varia
FT48p		5000	340	14,7	varia
FT49p		4900	300	16,3	varia
FT50		1500	130	11,53	varia
FT52s	Trullissatio	3000	240	12,5	varia
FT53s		900	80	11,25	varia
FT56a'		3600	250	14,4	varia
FT56a''		3300	230	14,34	varia
FT58a'		1900	230	8,26	varia
FT58a''		4000	200	20	molto varia
FT37a		700	290	2,41	uniforme
FT38a		700	290	2,41	uniforme
FT39a		1000	300	3,33	uniforme
FT40a		1100	270	4,07	uniforme
FT41a		4800	300	16	varia
FT42p		850	300	2,83	uniforme
FT44p	Arriccio	1000	160	6,25	uniforme
FT46p		530	280	1,89	uniforme
FT54s		1800	120	15	varia
FT56b'		1100	280	3,92	uniforme
FT56b''		850	230	3,69	uniforme
FT58b'		1900	240	7,91	varia
FT58b''		1400	200	7	varia
FT37b		1700	300	5,66	varia
FT38b		1600	250	6,4	varia
FT39b		1000	280	3,57	uniforme
FT40b		1600	220	7,27	varia
FT41b	Intonachino	1600	210	7,61	varia
FT43p		400	230	1,73	uniforme
FT45p		1600	260	6,15	varia
FT47p		400	230	1,73	uniforme
FT55s		230	150	1,53	uniforme

Tabella 10.3.3: Diametri determinanti D₁₀ - D₆₀ e coefficienti d'uniformità U dell'aggregato analizzato.

Gli arricci sono caratterizzati da coefficienti di uniformità $1,89 < U < 16$ e granulometrie prevalentemente fini con trattenuti massimi ai setacci di 500-250 µm. Nei campioni FT39a, FT40a, FT41a, FT42p, ed FT54s è presente un abbondante trattenuto anche ai setacci di 4000 µm.

Nei restanti campioni, fusi uniformi con trattenuti massimi a 500-250 μm , sono tipici di sabbie medie (medium sand, Wentworth 1922).

Gli intonachini consistono in fusi granulometrici da vari ad uniformi. I coefficienti di uniformità U sono compresi in un intervallo da 1,73 a 7,61.

Da Tab. 10.3.1 si può notare come le percentuali di trattenuto differiscano di campione in campione evidenziando un'elevata disomogeneità granulometrica. In FT37b, FT38b, FT41b, FT45p ed FT47p (Fig. 10.3.3a, b, c, d) il trattenuto è prevalente su crivelli di 2 e 1 mm. In FT40b ed in FT43p, il trattenuto è prevalente su crivelli di 500 e 250 μm . In particolare in FT43p, come visibile anche da Fig. 10.3.3, la granulometria è di tipo classato per diametri di 250 μm (sabbie medie prevalenti) con concentrazioni del 67,49% in peso.

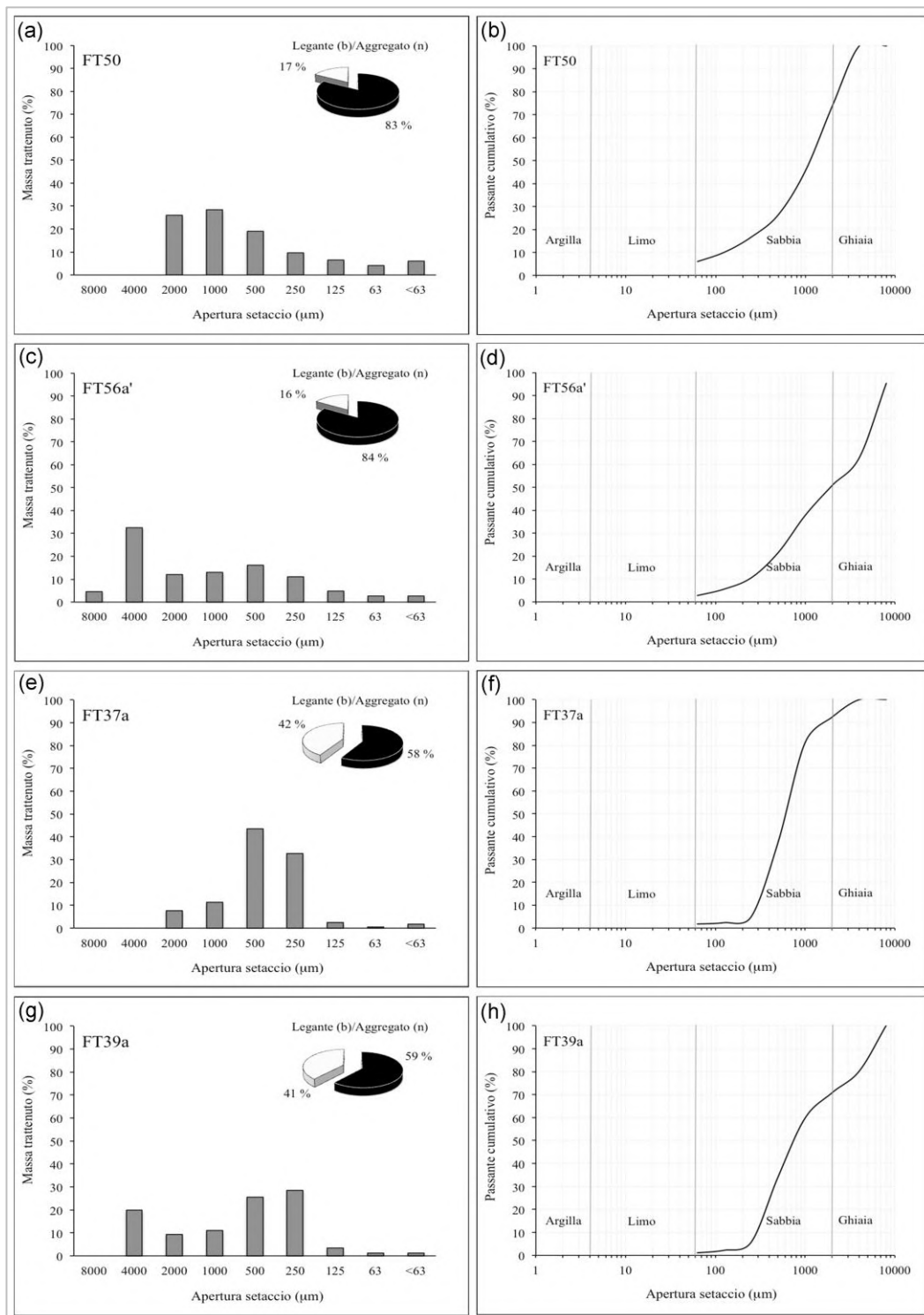


Figura 10.3.1: Esempi di istogrammi di trattenuto ai setacci e rapporto L/A nelle malte del Forum Traiani: (a, b) calcestruzzo pavimentale FT26, (b, c) calcestruzzo pavimentale FT51, (e, f) malta di allettamento del mosaico FT31b, (g, h) malta di allettamento dei conchi/laterizi FT61.

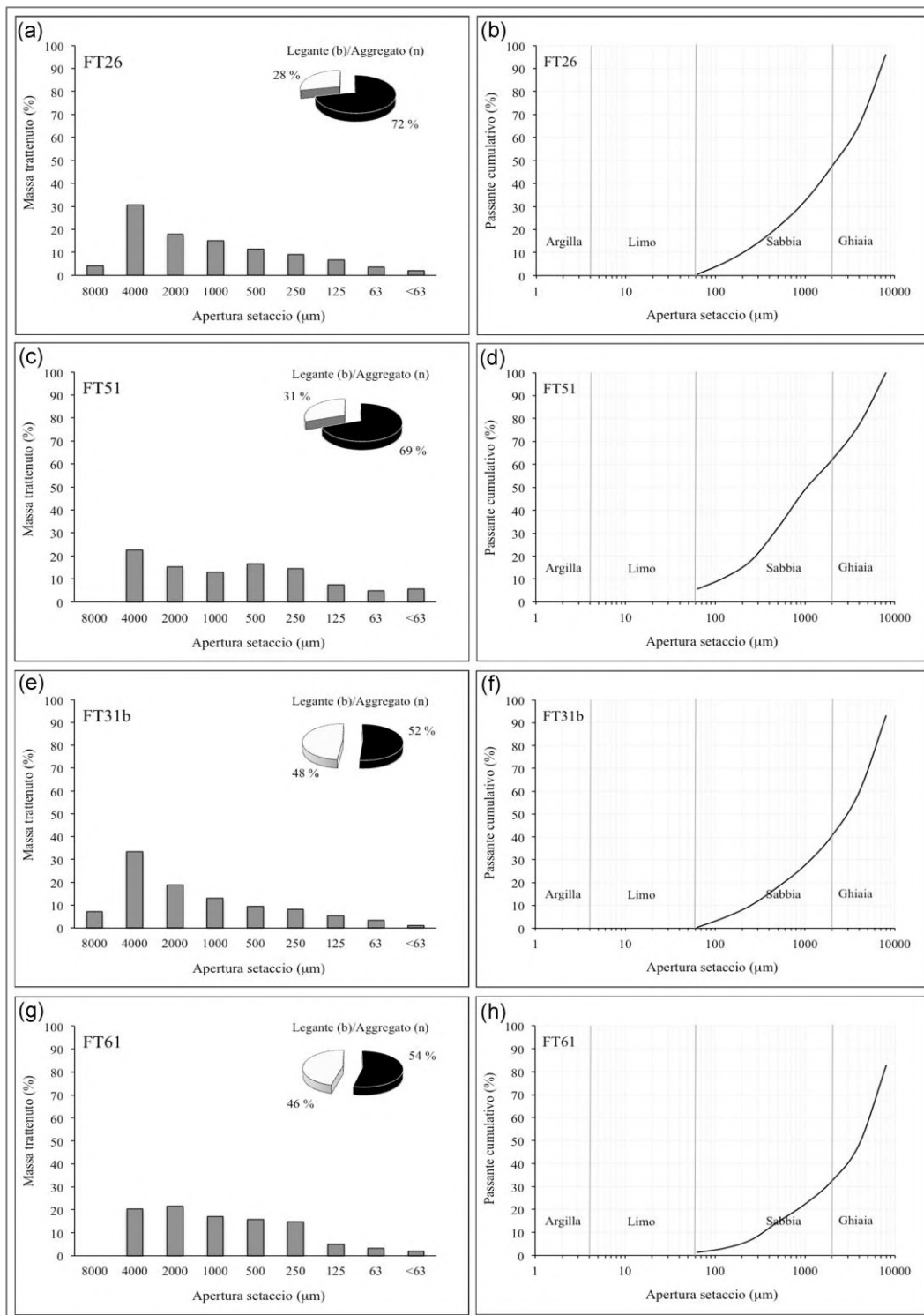


Figura 10.3.2: Esempi di istogrammi di trattenuto ai setacci e rapporto L/A nelle malte del Forum Traiani: (a, b) *Trullissatio* FT50, (b, c) *Trullissatio* FT56a', (e, f) arriccio FT37a, (g, h) arriccio FT39a.

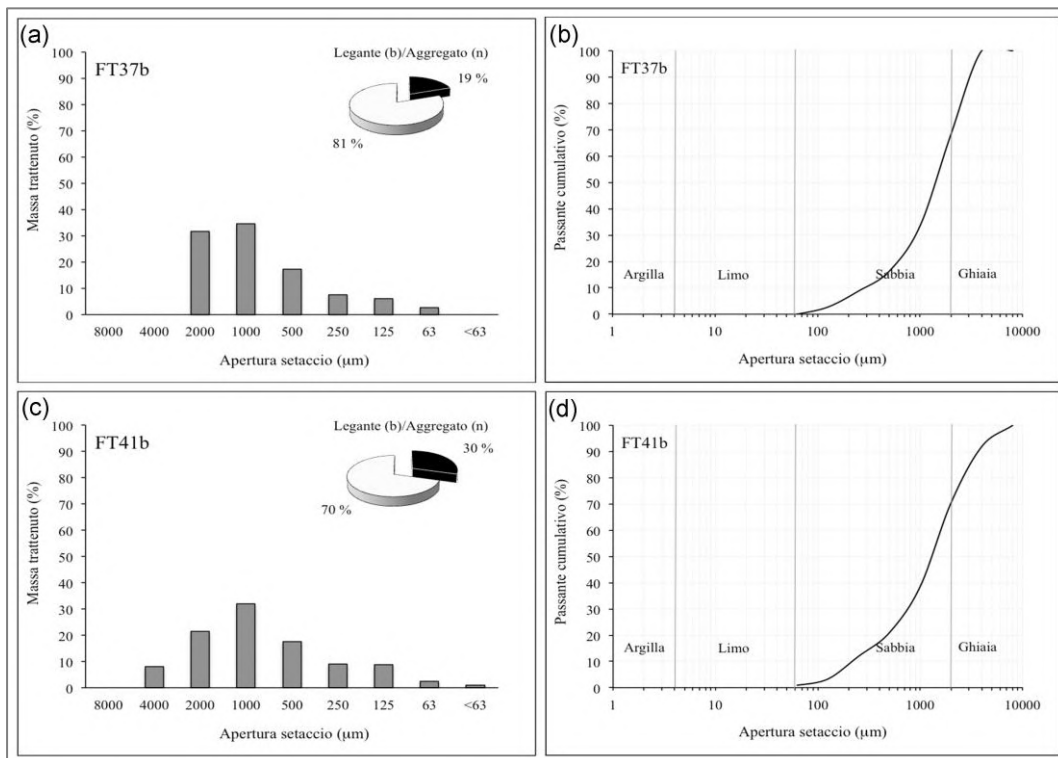


Figura 10.3.3: Esempi di istogrammi di trattenuto ai setacci e rapporto L/A nelle malte del Forum Traiani: (a, b) intonachino FT37b, (b, c) intonachino FT41b.

10.4 Diffrazione a Raggi X sulle malte (XPRD)

I risultati circa la diffrazione sulle malte del sito di Forum Traiani sono mostrati in Tab. 10.4.1.

Diverse fasi sialiche quali quarzo, plagioclasio e K-feldspato, sono state identificate in differenti quantità. Questi minerali rappresentano la composizione delle sabbie di natura quarzoso-feldspatica utilizzate come aggregato. La calcite è solitamente abbondante, ed è da attribuire principalmente al legante carbonatico e, subordinatamente, ai bioclasti.

Campione	Funzione	Cc	Qz	Pl	Kf	Mu	Cch	Ka	Ill	Al	Od	Hy	Gr
FT29		••	••	••	••	•	-	•	-	-	Tr	Tr	-
FT30	Calcestruzzo pavimentale	••	••	•	•	•	-	Tr	•	-	-	-	-
FT31a		•••	••	••	•	••	-	-	-	-	-	-	-
FT32a		•••	••	•	•	-	-	-	Tr	-	-	-	-
FT31b	Allettamento mosaico	••	••	•	•	•	-	-	-	-	-	-	-
FT32b		••	••	•	•	•	-	-	-	-	-	-	-
FT33	Allettamento conci/laterizi	•••	••	•	•	-	-	Tr	Tr	-	-	-	-
FT61		••	•••	•	-	-	-	-	•	-	-	-	-
FT62		•••	••	-	•	•	Tr	-	-	-	-	-	-
FT48p	<i>Trullissatio</i>	•••	••	•	-	•	-	-	-	Tr	-	-	-
FT49p		•••	••	•	•	-	-	-	Tr	-	-	-	-
FT56a'		•••	•	••	-	••	-	-	-	-	-	-	-
FT56a''		•••	••	•	•	•	-	-	-	-	-	-	-
FT58a'		•••	••	-	-	-	-	Tr	-	Tr	Tr	-	-
FT40a	Arriccio	•••	••	•	-	Tr	Tr	-	-	-	-	-	-
FT41a		•••	••	•	•	-	-	•	-	-	-	-	-
FT46p		•••	Tr	••	••	••	-	••	-	-	-	-	Tr
FT54s		•••	Tr	••	•	-	-	-	-	-	-	-	-
FT37b	Intonachino	•••	Tr	-	-	Tr	-	-	-	-	-	-	-
FT38b		•••	••	•	•	-	-	•	Tr	-	-	-	-
FT39b		•••	••	•	•	-	-	-	-	-	-	-	-
FT40b		•••	••	•	-	•	-	•	-	-	-	-	-

Tabella 10.4.1: Risultati della diffrazione (XRPD) sulle malte del sito di Forum Traiani. ••• = Molto abbondante; •• = Abbondante; • = Presente; Tr = presente in tracce; - = Non rilevato.

Cc = calcite, Qz = quarzo, Pl = plagioclasio, Kf = K-feldspato, Mu = muscovite, Cch = clorite, Ka = caolinite, Al = alite, Ill = illite, Od = oldhamite, Gr = grafite, Hy = idrocalumite.

La muscovite è presente in quantità abbondante in alcuni campioni (e.g. FT31a, FT56a', FT46p), mentre altre volte è presente in tracce (e.g. FT40a, FT37b, Fig. 10.4.1f, g).

La muscovite era già stata osservata in sezione sottile tra i cristallo-clasti presenti nell'aggregato.

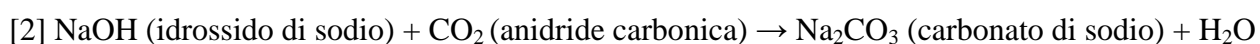
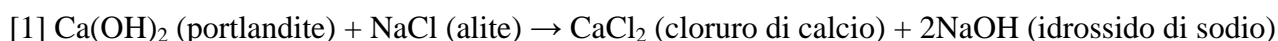
È incerta l'interpretazione circa tracce di cloruro di sodio (alite) nei campioni FT48p ed FT58a'.

È possibile che la fase provenga dall'aerosol marino poiché la costa dista dal sito in media 30 Km in linea d'aria a Ovest, direzione dalla quale provengono venti sufficientemente forti da trasportare NaCl in sospensione per distanze così ampie.

Un'altra possibile fonte di cloruro di sodio potrebbe essere quella idrotermale: l'area di Fordongianus-Traiani è, infatti, famosa per le risorgive d'acqua con carattere cloruro-sodico (Dettori et al. 1982). Alcune di queste risorgive sono tuttora presenti anche all'interno del sito.

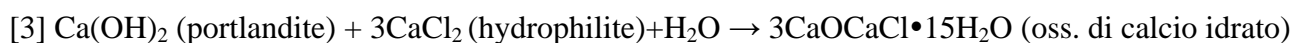
Un'ipotesi alternativa da prendere in considerazione è quella che il cloruro di sodio derivi dal mancato lavaggio in acqua dolce dell'aggregato sabbioso di origine marina utilizzato nel confezionamento della malta.

Il lavaggio dell'aggregato dal cloruro di sodio marino era un passaggio fondamentale già descritto da Vitruvio Pollione nel 15 AC. La mancata rimozione influenzava da un lato i normali tempi di presa della malta, e dall'altro lato provocava ben più gravi danni alla muratura (Cagnana 2000). Tali danni sono dovuti anche alle reazioni del cloruro di sodio con la portlandite Ca(OH)_2 (già nelle prime fasi della posa in opera) secondo le reazioni [1, 2]:



Secondo la [1] nella reazione tra portlandite Ca(OH)_2 e cloruro di sodio si ha la produzione di cloruro di calcio CaCl_2 e d'idrossido di sodio (NaOH) il quale, reagendo con l'anidride carbonica atmosferica nella [2], produce carbonato di sodio in efflorescenze di colorazione bianca. Inoltre lo stesso cloruro di sodio anche qualora non dovesse reagire con la portlandite nella [1], cristallizza comunque a 25°C ad una umidità relativa di 30% circa. La facilità nel cristallizzare e solubilizzare del cloruro di sodio produce variazioni cicliche di natura igroscopica internamente alla pietra della muratura o alla malta, causandone il degrado fisico. Per altro, anche in assenza del processo ciclico di cristallizzazione/solubilizzazione del sale, le sue caratteristiche igroscopiche facilitano la presenza costante di umidità rendendo difficile l'asciugatura della parete. Oltre ai danni dei sali, si aggiunge lo sviluppo delle muffe, le alterazioni e il distacco dei dipinti murali fino alla completa disgregazione degli intonaci e/o pigmenti (Cagnana 2000).

Un'altra reazione che coinvolge le strutture in cui sono utilizzate malte idrauliche (in particolare quelle cementizie) è il contatto con cloruri di calcio (CaCl_2 , hydrophilite):



La [3] consiste nella trasformazione della portlandite in ossicloruro di calcio idrato, fase estremamente solubile.

Nel campione d'intonaco di arriccio FT46p (Fig. 10.4.1g), sono state rinvenute tracce di grafite (C) la quale potrebbe derivare da residui di combustione di legna utilizzata nella fornace di cottura dei calcari (Garau 2005).

Nello stesso campione FT29 si riscontrano tracce d'idrocalumite (Fig. 10.4.1a). Secondo Brandon et al. (2008), la presenza di questo minerale potrebbe essere associata alla reazione tra anioni Cl^- ed

i gel C-A/S-H. L'idrocalumite microcristallina è fortemente dannosa per le malte, in quanto produce dilatazioni differenziali legate al processo ciclico di cristallizzazione/solubilizzazione.

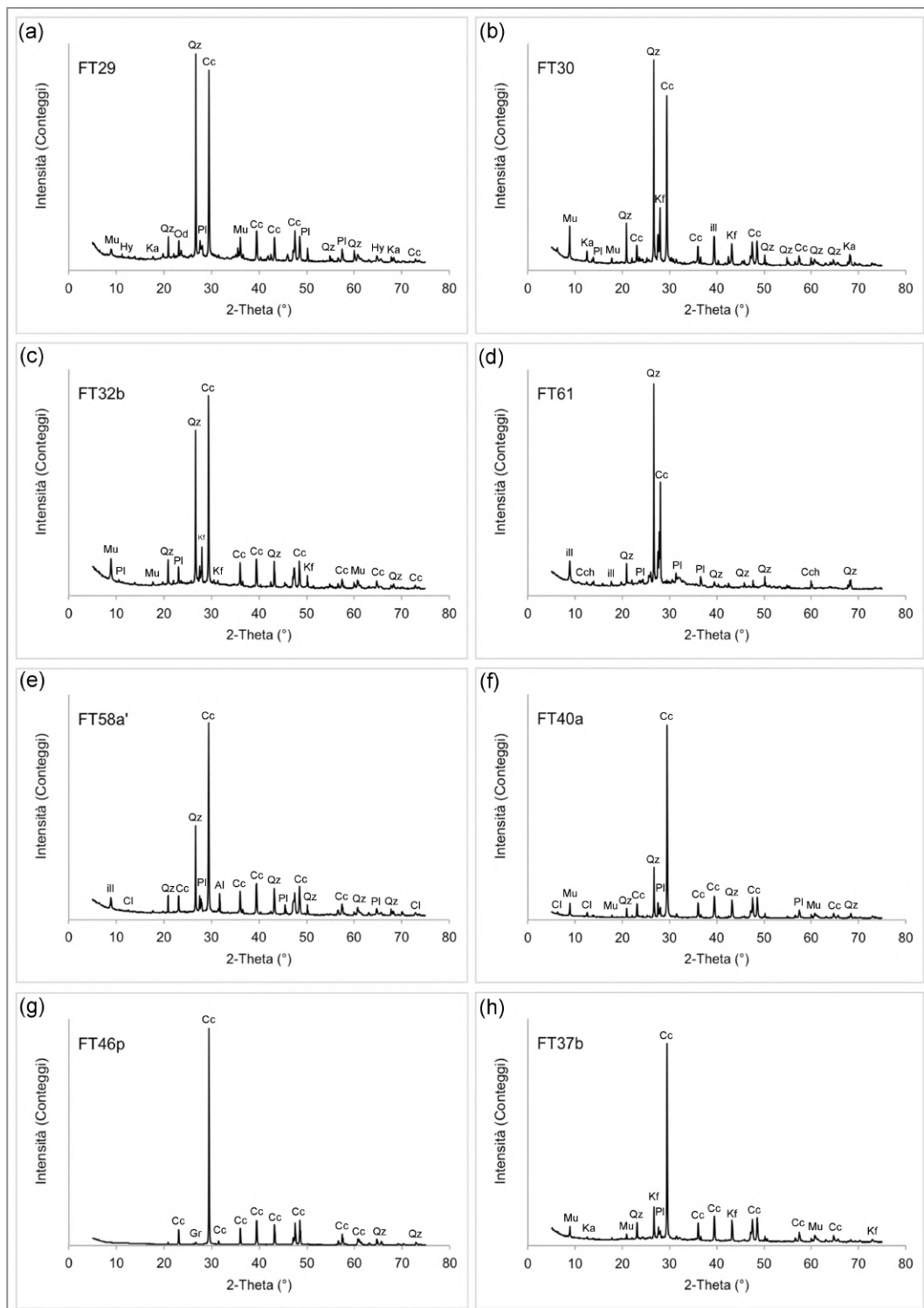


Figura 10.4.1: Risultati della diffrazione (XPRD) eseguita sulle malte del sito di Forum Traiani. (a, b) calcestruzzi pavimentali (FT29, FT30), (c) allettamento del mosaico (FT32b), (d) allettamento conci/laterizi (FT61), (e, f) *Trullissatio* (FT58a', FT40), (g) arriccio (FT46p), (h) intonachino (FT37b). Cc = calcite, Qz = quarzo, Pl = plagioclasio, Kf = K-feldspato, Mu = muscovite, Cch = clorite, Ka = caolinite, Al = alite, Ill = illite, Od = oldhamite, Gr = grafite, Hy = idrocalumite.

10.5 Analisi termo-gravimetrica (TGA) sulla frazione legante

Le curve di decomposizione termica relative alle malte del sito di Forum Traiani, mostrate in Fig. 10.5.1a, b, c, d, e, f, presentano tre perdite in peso caratteristiche. In un primo intervallo di temperatura variabile tra 40 e 60 °C (centrato a 50 °C), si nota il solito picco negativo con percentuali di perdita sino a 2%, associato all'evaporazione dell'acqua di umidità presente nel campione.

Alla temperatura di circa 80-90 °C una debole rottura di pendenza della curva è dovuta all'allontanamento dell'acqua igroscopica.

Campione	Funzione	Peso perso per range di temperatura (%)		$\Delta\text{CO}_2/\Delta\text{H}_2\text{O}$
		200-520 °C ($\Delta\text{H}_2\text{O}$)	520-800 °C (ΔCO_2)	
FT29		0,72	1,81	2,52
FT30	Calcestruzzo pavimentale	3,59	2,53	0,70
FT31a		4,20	3,21	0,76
FT32a		3,72	3,00	0,81
Media aritmetica		3,06	2,64	1,20
Deviazione standard		1,58	0,62	0,88
FT31b	Allettamento del mosaico	1,05	18,03	17,23
FT32b		2,17	14,44	6,65
Media aritmetica		1,61	16,23	11,94
Deviazione standard		0,80	2,53	7,48
FT33		2,18	20,26	9,28
FT61	Allettamento di conci/laterizi	4,69	19,55	4,17
FT62		2,27	20,15	8,87
Media aritmetica		3,05	19,98	7,44
Deviazione standard		1,42	0,38	2,84
FT48p		6,72	17,24	2,56
FT49p		3,09	15,56	5,04
FT56a'	<i>Trullissatio</i>	3,17	15,66	4,95
FT56a''		1,81	21,87	12,10
FT58a'		5,94	16,81	2,83
Media aritmetica		4,15	17,43	5,50
Deviazione standard		2,09	2,58	3,87
FT40a	Arriccio	1,09	21,37	19,53
FT41a		1,09	24,31	22,38
FT46p		0,93	23,27	24,98
FT54s		1,06	21,73	20,46
Media aritmetica		1,04	22,67	21,84
Deviazione standard		0,08	1,37	2,41
FT37b		2,24	22,04	9,82
FT38b	Intonachino	1,49	16,70	11,17
FT39b		1,46	21,63	14,79
FT40b		1,66	22,04	13,31
Media aritmetica		1,71	20,60	12,27
Deviazione standard		0,36	2,61	2,21

Tabella 10.5.1: Analisi termo-gravimetriche sui leganti delle malte: percentuale di peso perso in intervalli di temperatura 200-520 °C ($\Delta\text{H}_2\text{O}$) e 520-800 °C (ΔCO_2).

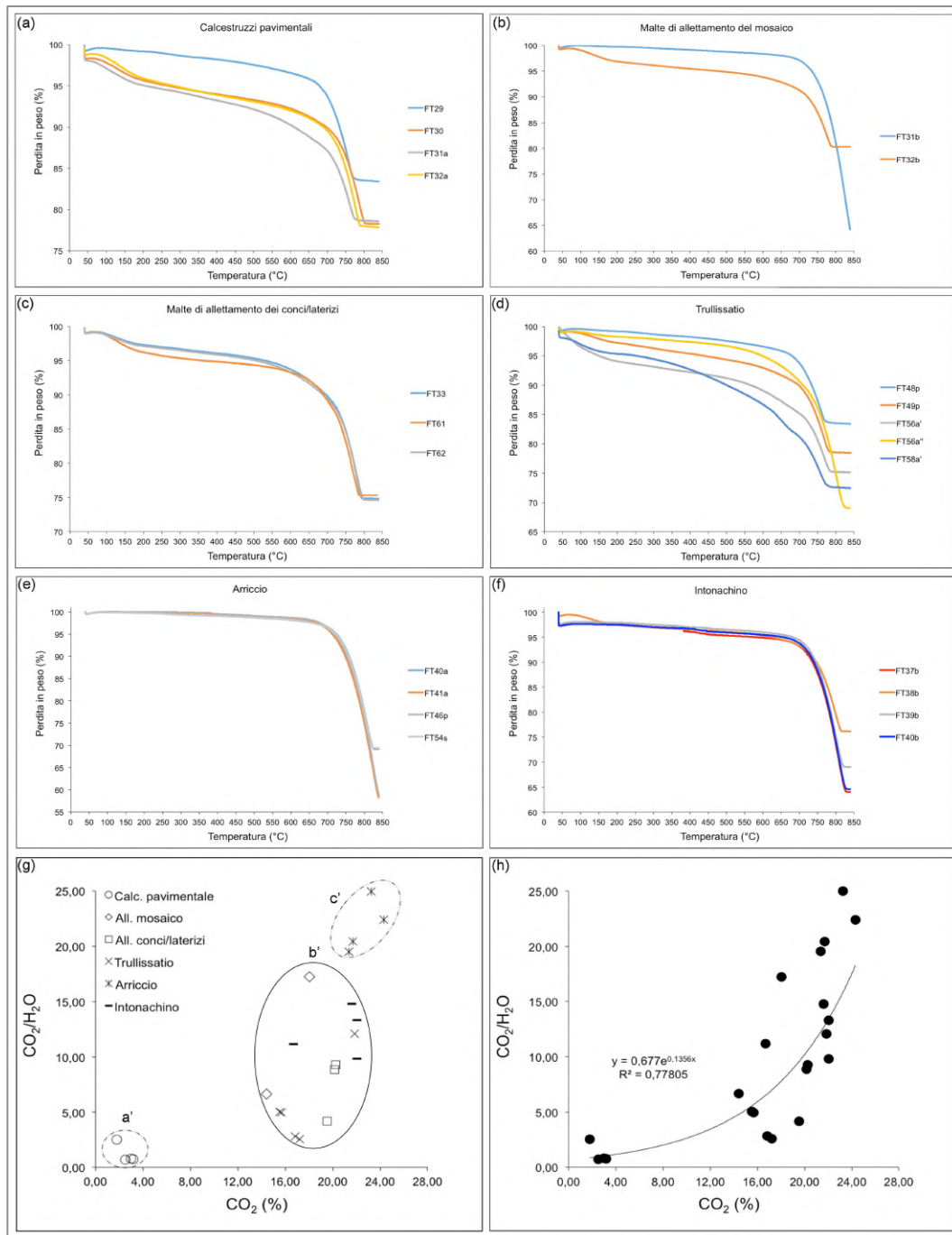


Figura 10.5.1: Analisi termo-gravimetriche sui leganti delle malte: (a) curve di decomposizione termica dei calcestruzzi pavimentali, (b) malte di allettamento del mosaico, (c) malte di allettamento dei conci/laterizi, (d) *Trullissatio*, (e) arriccio, (f) intonachino, (g) rapporto $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ vs CO_2 per le malte campionate suddivise in gruppi, (h) rapporto $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ vs CO_2 per le malte campionate riunite in una sola serie.

Una rilevante perdita in peso è rilevata tra 520 e 800 °C dovuta alla decarbonatazione del legante. Osservando le perdite in peso relative ad anidride carbonica e acqua, riportate in Tab. 10.5.1, è visibile una chiara differenza d'idraulicità fra i gruppi di malta. Osservando il diagramma di Moropoulous (2000) in cui sono riportati i dati di CO_2 vs $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ di Tab. 10.5.1, si evidenzia un quadro interessante circa la disposizione dei campioni e dei gruppi di

malta. Anche in questo caso, come si registrava nelle malte delle Piccole Terme presso il sito di Nora (Pula), l'insieme dei campioni può essere suddiviso in tre gruppi a', b', c' in base al modulo ΔCO_2 .

Nell'insieme a' trovano posto i soli calcestruzzi pavimentali con $\Delta\text{CO}_2 = 2,64 \pm 0,62\%$, la cui forte idraulicità potrebbe essere imputabile all'elevato quantitativo di *Cocciopesto* impiegato nella malta, caratterizzato, per altro, da evidenti bordi di reazione con il legante carbonatico, come già si osservava in OM.

Nell'insieme b' (Fig. 10.5.1g), sono presenti i gruppi di malta con idraulicità intermedia, quali malte di allettamento dei conci/laterizi ($\Delta\text{CO}_2 = 19,98 \pm 0,38\%$), malte di allettamento del mosaico ($\Delta\text{CO}_2 = 16,23 \pm 2,53\%$), *Trullissatio* ($\Delta\text{CO}_2 = 17,43 \pm 2,58\%$) ed intonachini ($\Delta\text{CO}_2 = 20,60 \pm 2,61\%$).

L'idraulicità più bassa è registrata nei campioni di arriccio con una media di $\Delta\text{CO}_2 = 22,67 \pm 1,37\%$ (Tab. 10.5.1, Fig. 10.5.1g). Di solito i più bassi gradi d'idraulicità sono identificati negli intonachini ma in questo caso sono attribuiti ai campioni di arriccio, perché alcuni di essi (e.g. FT41a ed FT38b) si discostano dalla media del gruppo. Non solo, i campioni di arriccio presentano un contenuto $\Delta\text{H}_2\text{O}$ particolarmente basso rispetto agli altri gruppi di malta.

In Fig. 10.5.1h, i 22 campioni di malta sono riuniti in una sola serie e plottati nel diagramma di Moropoulous (2000), dove si dispongono secondo una linea di tendenza di tipo esponenziale con coefficiente di correlazione $R^2 = 0,77$.

Osservando la Fig. 10.5.1 si nota che nelle malte del sito di Forum Traiani l'idraulicità sembra essere direttamente correlata con la quantità di *Cocciopesto* presente nell'impasto.

10.6 Analisi in microscopia elettronica (SEM-EDS) sulle rocce

Durante l'osservazione delle ignimbriti mediante microscopia elettronica SEM-EDS in sezione sottile, sono state identificate le fasi minerali non risolvibili al solo microscopio polarizzatore.

Uno dei primi obiettivi è stato analizzare il processo di devetrificazione delle pomice già osservato macroscopicamente e in sezione sottile. In particolare è stata studiata un'area superficiale della roccia (Fig. 10.6.1), caratterizzata da una colorazione verde in CIELAB 81*-38*17.

Internamente alla matrice cineritica (vetrosa) di tale area, l'analisi SEM-EDS ha dimostrato la presenza di fasi cristalline, quali celadonite $K(Mg,Fe^{2+})(Fe^{+3}Al)[SiO_4](OH)_2$ e glauconite $(Fe^{+3}, Al, Mg)_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$.

Il processo di devetrificazione nelle rocce ignimbritiche è ben noto in bibliografia ed è stato approfonditamente studiato da Harlov & Austrheim (2013). La presenza di celadonite e glauconite deriva essenzialmente dalla devetrificazione della matrice vetrosa pomiceo-cineritica del litotipo che inizia già a livello singenetico per poi proseguire a causa di processi epigenetici.

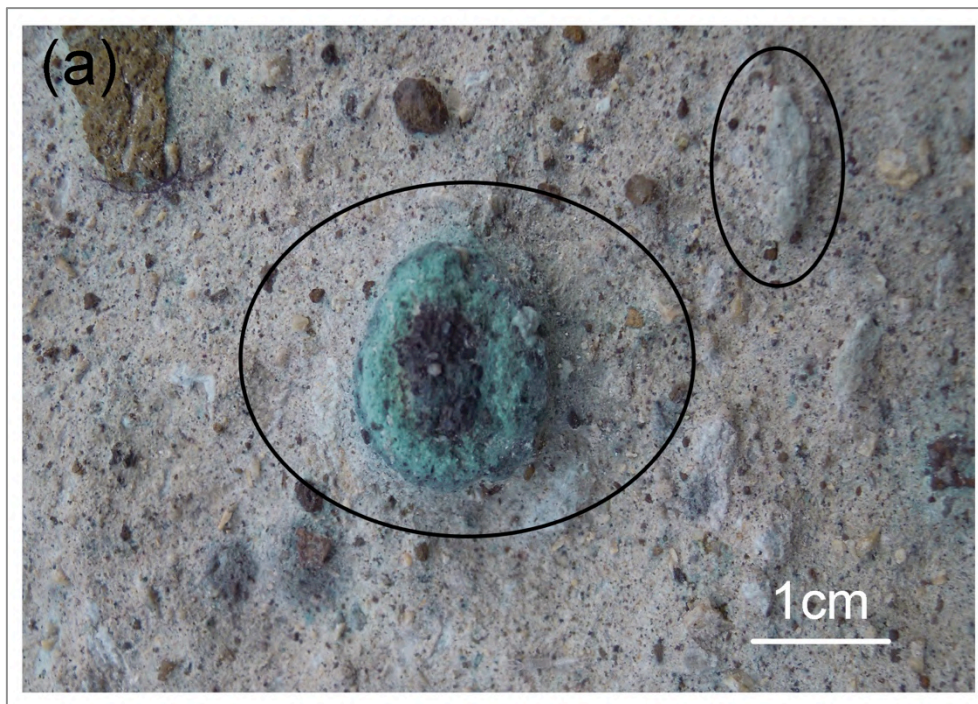


Figura 10.6.1: Processo di devetrificazione su pomice (campione FT1) con formazione di celadonite e glauconite (in verde).

In Fig. 10.6.2a, b è mostrato un processo di devetrificazione di una pomice osservato in OM ed in SEM-SE. Al microscopio petrografico, la superficie in esame è suddivisa in un'area di colorazione marroncina (sulla destra in basso) e verde (sulla sinistra in alto, zona mineralizzata) separata da un'interfaccia irregolare e sfumata. All'immagine SEM-SE di Fig. 10.6.2b, sono stati applicati i tematismi di concentrazione degli elementi Al, Si (Fig. 10.6.2c), Mg, K, Fe (Fig. 10.6.2d). Il

tematismo Al-Si evidenzia una forte concentrazione di Al nella zona di colorazione marroncina che diminuisce progressivamente nella zona mineralizzata (in alto a sinistra). L'andamento del silicio, seppur meno abbondante rispetto all'Al, è decrescente in senso opposto. Per quanto riguarda Mg, K e Fe, si nota invece una concentrazione di Mg-Fe nella zona di colorazione marroncina, dove il potassio sembra assente o comunque localizzato solo in piccole aree. Muovendosi verso la zona mineralizzata, si nota una progressiva diminuzione di Mg e Fe ed un rapido aumento della concentrazione di K sino ad una certa area nella quale K ed Fe coesistono in proporzioni simili.

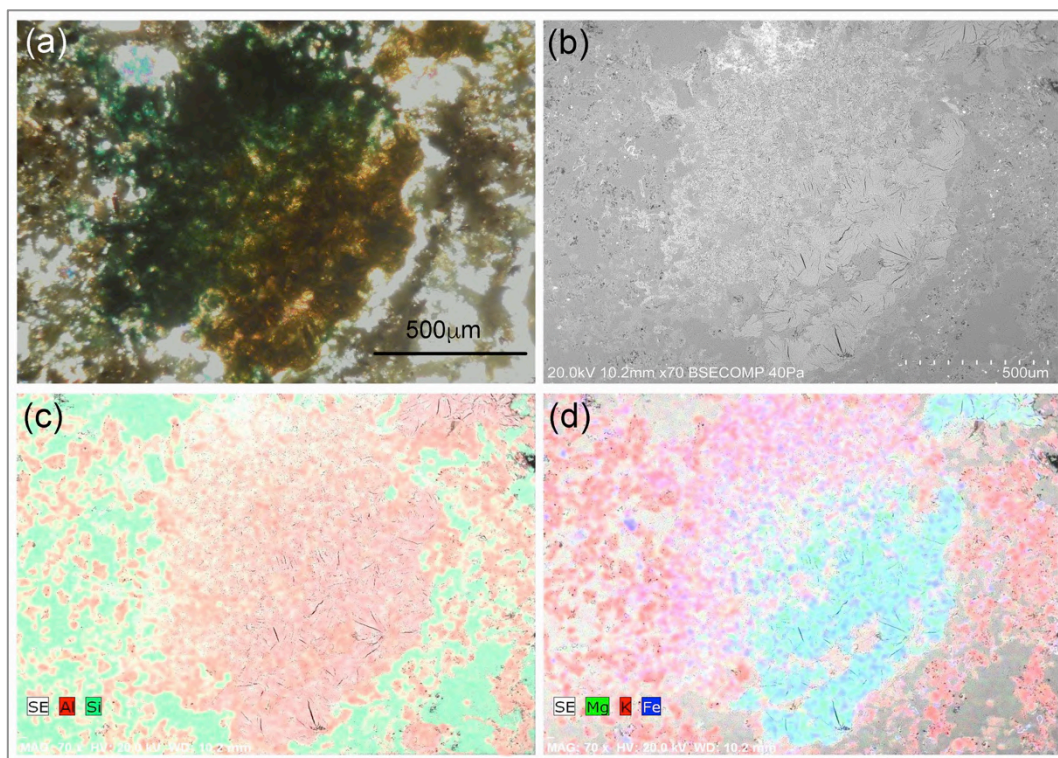


Figura 10.6.2: Processo di devetrificazione su una pomice. (a) osservazione al microscopio polarizzatore (OM), (b) osservazione (SEM-SE), (c) mappatura Al, Si, (d) mappatura Mg, K, Fe.

Un altro processo che è stato oggetto d'indagine, osservato macroscopicamente ed in sezione sottile sulla roccia ignimbratica, è legato alla presenza di microcristalli (10 µm), dispersi nella pasta di fondo e concentrati in punti specifici non risolvibili in sola OM.

Nella Fig. 10.6.3a è rappresentata la linea di contatto (evidenziata in rosso) tra una di queste dispersioni microcristalline (area in basso) e la pasta di fondo (area in alto) in un campione di ignimbrite già osservato in OM.

Nella stessa foto, la pasta di fondo mostra la tessitura eutassitica della roccia già descritta precedentemente.

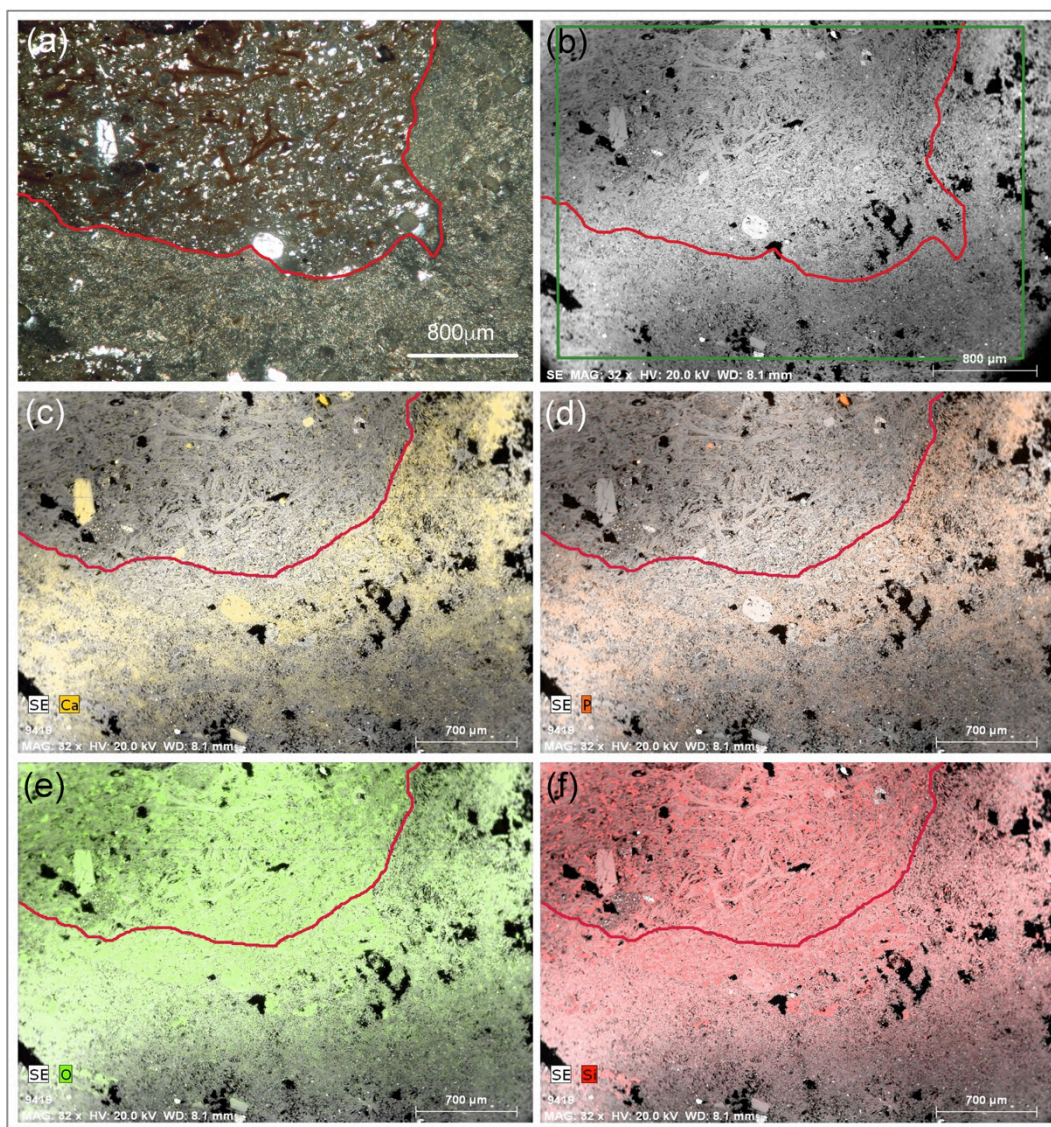


Figura 10.6.3: Linea di contatto tra pasta di fondo (in alto rispetto alla linea rossa) e microcristalli (in basso) nel campione FTc22. (a) osservazione OM, (b) osservazioni SEM-SE, (c) mappatura di Ca, (d) mappatura di P, (e) mappatura di O, (f) mappatura di Si.

La mappatura dell'area di contatto per i diversi elementi chimici mostra un'evidente variazione solo di Ca, P, O e Si. Per quanto riguarda il calcio ed il fosforo, in Fig. 10.6.3c, d si nota come le concentrazioni siano più elevate nell'area occupata dai microcristalli rispetto alla pasta di fondo dell'ignimbrite.

Le concentrazioni di ossigeno e silicio (Fig. 10.6.3e, f) invece sembrano essere opposte e più elevate nella pasta di fondo rispetto all'area in cui sono presenti i microcristalli. Dall'analisi si evince quindi che la porzione in analisi consiste in microcristalli di apatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3[\text{F}, \text{OH}, \text{Cl}]$), per altro frequente nelle ignimbriti.

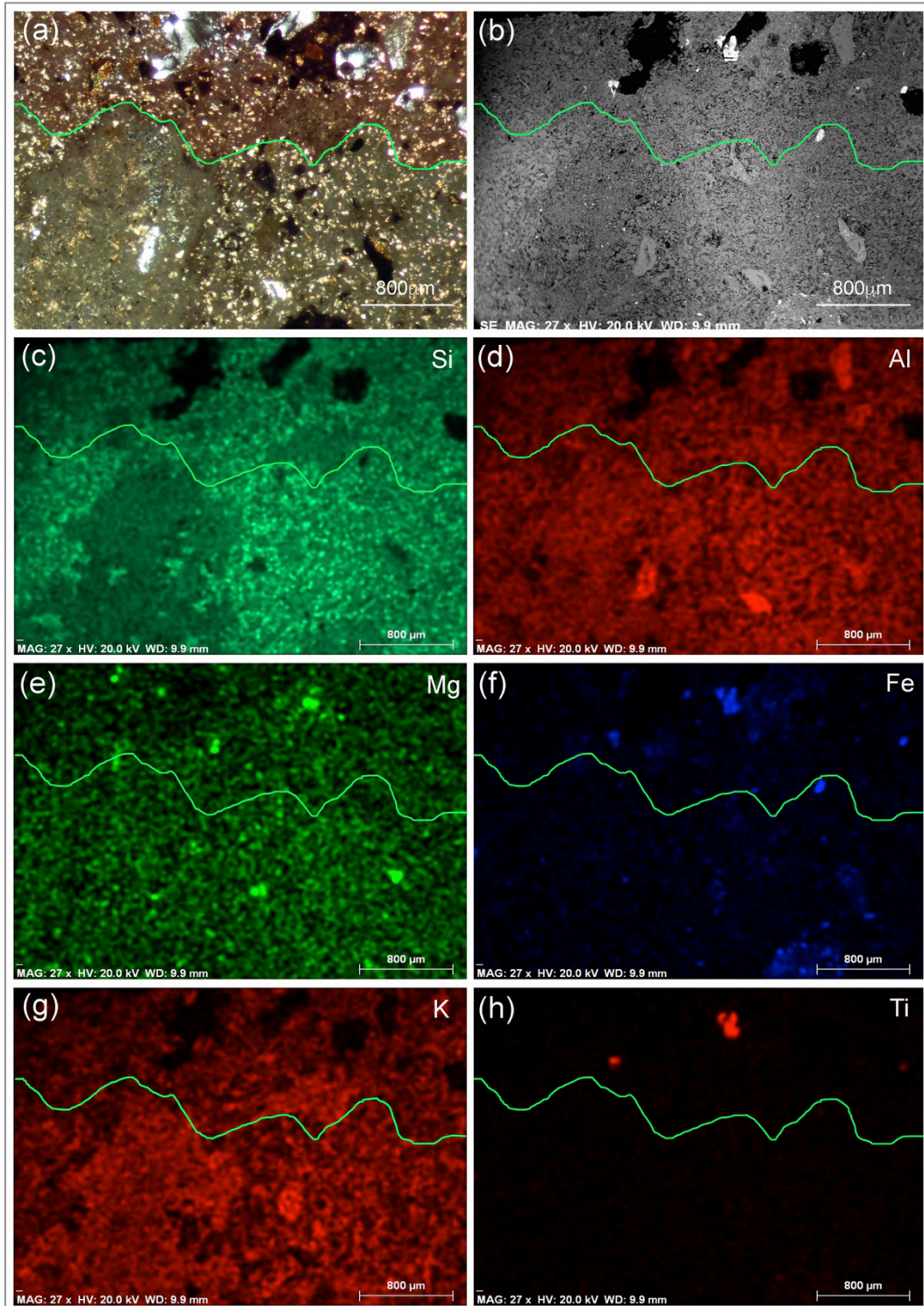


Figura 10.6.4: Area di analisi dell'interfaccia a differente colorazione (campione FT 28). La linea di contatto è stata evidenziata con colorazione verde. (a) osservazione in OM-NP (b) osservazioni in SEM-SE, (c) mappatura di Si, (d) mappatura di Al, (e) mappatura di Mg, (f) mappatura di Fe, (g) mappatura di K, (h) mappatura di Ti.

In analisi SEM-EDS con associata analisi petrografica in OM è stato inoltre indagato un particolare caso di variazione di colorazione visibile a livello macroscopico della pasta di fondo dell'ignimbrite in una zona di contatto (campione FT28). La variazione cromatica, come da Fig. 10.6.4a, è ben visibile anche in sezione sottile a nicols paralleli. L'interfaccia tra le due diverse aree cromatiche in

esame (Fig. 10.6.4), è stata evidenziata con una linea verde che suddivide l'area a colorazione rossastra (posta superiormente), da quella rosata (posta inferiormente). La foto in sezione sottile 10.6.4a è stata riprodotta anche in SEM-SE come mostrato nell'immagine 10.6.4b, sulla quale sono stati in seguito applicati dei tematismi relativi alle concentrazioni di Si, Al, Mg, Fe, K e Ti. I tematismi di silicio ed alluminio in Fig. 10.6.4c, d, non evidenziano variazioni di concentrazione dei due elementi tra le due aree. Lo stesso avviene per gli elementi Mg, Fe, K, Ti (Fig. 10.6.4e, f, g, h). Secondo Koralay & Kadyoglu (2008), la variazione di colore sia a livello macroscopico che microscopico della pasta di fondo nelle rocce piroclastiche (e.g., ignimbriti) sarebbe principalmente dovuta alla variazione degli elementi Fe e K. Tuttavia, in questo caso le mappature di Fig. 10.6.4f, g non sembrano comportare variazioni di questi elementi.

È quindi probabile che la variazione cromatica sia dovuta ad alcuni elementi chimici (ad esempio elementi in traccia) con concentrazioni molto basse da non essere rilevate dal microscopio elettronico con sonda EDS.

Ulteriori indagini sulle variazioni cromatiche nelle ignimbriti dell'area di Fordongianus utilizzate nel sito di Forum Traiani sono tuttora in corso.

10.7 Caratterizzazione composizionale dei pigmenti degli affreschi parietali

Alcuni intonachini campionati nelle strutture abitative U2, U3 e nel *Frigidarium* presentano tracce di pittura di colorazioni nere, arancio e rosse.

La caratterizzazione di questi pigmenti è avvenuta con una micro-diffrazione superficiale (μ -XRD) e con le tecniche μ -Raman e μ -FTIR.

I risultati ottenuti dalla micro-diffrazione sui tutti i pigmenti campionati sono presentati in Tab. 10.7.1 mentre, in Fig. 10.7.1 c, d, sono illustrati i risultati di due campioni più rappresentativi ovvero FT39b e FT47p. I pigmenti prendono il nome del relativo intonachino su cui sono stati campionati.

Intonachino	Colore del pigmento	Ca	Nit	Pla	Kf	Qz	Prx	Mu/Ill	Hm	Liz	Ru	Go	Hy
FT37b	Rosso	•	••	•••	-	Tr	•	-	-	-	-	-	-
FT38b	Rosso	••	-	•	-	•	-	•	Tr	Tr	-	-	-
FT39b	Arancione	••	-	•	•	•	-	•	Tr	Tr	-	Tr	-
FT40b	Arancione	•••	•	-	-	Tr	-	Tr	Tr	-	Tr	Tr	-
FT41b	Rosso	•••	-	•	-	Tr	-	•	Tr	-	-	-	-
FT43p	Nero	••	••	•	-	Tr	-	-	-	-	Tr	-	-
FT43p	Rosso	•	•••	•	•	Tr	•	-	-	-	-	-	-
FT47p	Rosso	••	•••	•	-	Tr	Tr	-	Tr	-	-	-	Tr

Tabella 10.7.1: Risultati della micro-diffrazione (μ -XRD) sui pigmenti. Ca = calcite, Nit = nitratina, Pla = plagioclasio, Kf = K-feldspato, Qz = quarzo, Prx = pirosseno, Mu/Ill = muscovite/illite, Hm = ematite, Liz = lizardite, Ru = rutilo, Go = goethite, Hy = idrocalumite. - = assente, Tr = Tracce, • = presente, •• = abbondante, ••• = molto abbondante.

In tutti i campioni, la calcite è stata identificata come fase primaria del legante.

Altre fasi mineralogiche quali plagioclasio, K-feldspato, quarzo, pirosseno, rutilo e muscovite sono riconducibili a frammenti (cristallo-clasti) di aggregato dello stesso intonachino.

La nitratina e l'idrocalumite sono efflorescenze superficiali dovute rispettivamente a: evaporazione in superficie dell'acqua igroscopica presente nella malta (Siedel 2018), reazione tra gel idraulici C-A/S-H presenti nel legante ed il cloro (Vola et al. 2011) derivante dalle acque di risorgiva termale affioranti nel sito di Forum Traiani.

Sulla maggior parte dei pigmenti analizzati, il colore rosso, considerando l'identificazione dell'ematite (Tab. 10.7.1), è stato ottenuto con ossidi di ferro (molto probabilmente *ocra rossa*). Sui campioni di color arancio sono state identificate sia l'ematite che la goethite, fasi spesso utilizzate in epoca Romana per la produzione di pigmenti (Piovesan et al. 2011).

Sul campione FT43p non sono stati rilevati ossidi di ferro, il che suggerirebbe l'utilizzo di carbone per la realizzazione del pigmento nero.

Uno spettro μ -FTIR rappresentativo dei campioni in studio è mostrato in Fig. 10.7.1e, nel quale è stato possibile identificare alcune delle caratteristiche bande di assorbimento degli alluminosilicati (1042 cm^{-1} correlata alla $\nu(\text{Al-Si})$), dei carbonati di calcio ($1795, 1405\text{ cm}^{-1}$) dovute allo stiramento $\nu(\text{CO}_3^{2-})$ e $872\text{-}711\text{ cm}^{-1}$ relative a $\delta(\text{CO}_3^{2-})$, Sagin et al. 2012).

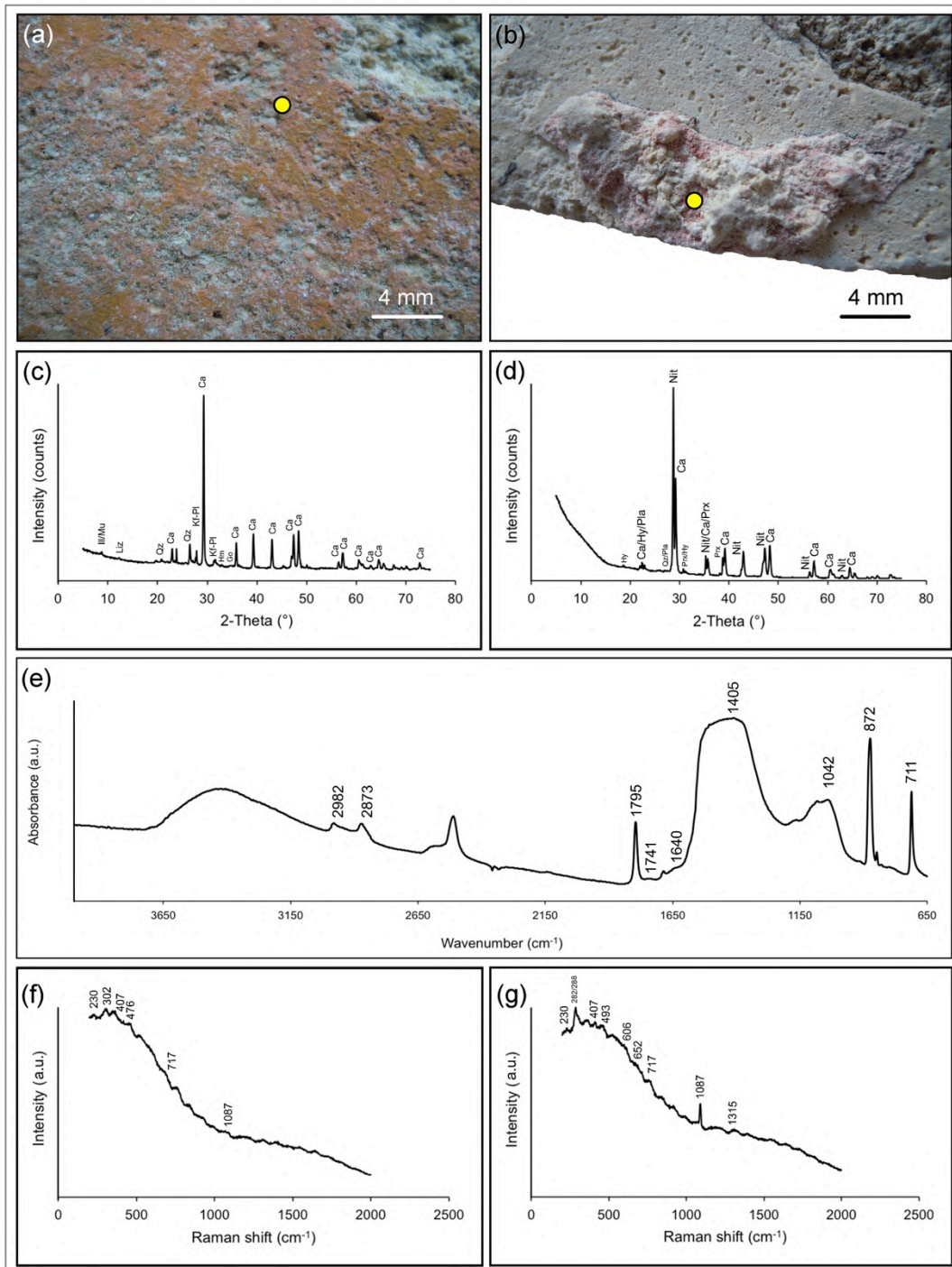


Figura 10.7.1: Caratterizzazione composizionale dei su due pigmenti: (a) punto di analisi sul campione FT39b, (b) punto di analisi sul campione FT47p, (c) analisi μ -XRD su FT39b, (d) analisi μ -XRD su FT47p, (e) spettro rappresentativo dell'analisi μ -FTIR dei campioni FT39b ed FT47p, (f) analisi μ -Raman su FT39b, (g) analisi μ -Raman su FT47p.

La banda di assorbimento a 1741 cm^{-1} può essere attribuita allo stiramento carbonilico dell'estere ν ($\text{C} = \text{O}$) dei trigliceridi ossidati mentre quella a 1640 cm^{-1} che può essere correlata allo stiramento dell'amide I ν ($\text{C} = \text{O}$). Queste ultime, insieme alla banda di assorbimento di CH dovuta allo stiramento del metilene a circa 2982 e 2873 cm^{-1} , suggeriscono la presenza di una tempera fortemente ossidata come mezzo legante nelle pitture (Miguel et al. 2012).

Tutti i risultati ottenuti dalla microscopia Raman sono simili a quelli ottenuti in altri lavori analitici eseguiti su pitture murali Romane (Aliatis et al. 2010, Baraldi et al. 2007, Gutman et al. 2016).

In Fig. 10.7.1f, g, sono stati riportati anche gli spettri Raman dei campioni FT39b (arancione) e FT47p (rosso) prima esaminati. In questi, bande relative alla calcite ($230, 282, 717$ e 1087 cm^{-1}), sono state identificate nella maggior parte dei campioni. I campioni a pigmenti rossi, caratterizzati dalla presenza di ematite, mostrano le caratteristiche bande Raman a $225, 288, 407, 493, 606, 652$ e 1315 cm^{-1} , mentre nei campioni arancioni sono state identificate entrambe le caratteristiche bande Raman di ematite e goethite a $302, 386$ e 476 cm^{-1} , come precedentemente osservato nelle analisi μ -XRD (Tab. 10.7.1).

10.8 Analisi composizionale delle serie stratigrafiche delle malte parietali: significato archeometrico

Come si specificava nel Capitolo 5 relativo al campionamento dei materiali nel sito di Forum Traiani, oltre ai campioni raccolti singolarmente, due serie stratigrafiche di malte d'intonaco sono state campionate da due pareti murarie col metodo del carotaggio (drilling).

Una prima serie stratigrafica di malte (serie p) è stata campionata nel *Frigidarium* (stanza “n”, Fig. 5.5.1b, Capitolo 5) ed è composta da tre strati alternati di arriccio-intonachino e due strati di *Trullissatio* (FT42p, 43p, 44p, 45p, 46p, 47p, 48p, 49p).

Una seconda serie stratigrafica di malte (serie s) è stata campionata in una cisterna d'acqua (struttura “v”, Fig. 5.5.1b, Capitolo 5) ed è composta da due *Trullissatio*, un arriccio ed un intonachino (FT52s, 53s, 54s, 55s).

La prima serie stratigrafica (Fig. 10.8.1) presenta almeno quattro cicli d'intonacatura di cui uno incerto. Tre cicli d'intonacatura riguardano tre strati successivi arriccio-intonachino, mentre un possibile quarto sarebbe dato dalla successione dei due campioni di *Trullissatio* contigui FT48p ed FT49p.

Questa serie è estremamente importante nell'analisi di alcuni aspetti relativi alle fasi di costruzione del *Frigidarium* “n”.

Nel primo ciclo d'intonacatura, la superficie dell'intonachino FT43p è caratterizzata da un affresco (A-A'). In seguito, sul primo ciclo sono stati realizzati un secondo (II) ed un terzo (III) ciclo d'intonacatura con relative superficie affrescate B-B' e C-C' (Fig. 10.8.1). L'analisi composizionale dei pigmenti utilizzati negli affreschi è stata trattata nel Paragrafo 10.7.

La presenza di superfici affrescate indica che i cicli d'intonacatura arriccio-intonachino II e III sono probabilmente interventi di restauro realizzati sul primo ciclo oppure diverse fasi di utilizzo delle terme nel tempo. Nel primo caso, il degrado che ha portato al successivo intervento di restauro sugli intonaci e sui dipinti nel *Frigidarium* poteva essere causato dalla costante presenza di umidità nella stanza (ospitava infatti acqua nella sottostante vasca) o dalle frequenti inondazioni del vicino fiume Tirso che hanno provocato talora un riempimento di coltri alluvionali nelle stanze dell'impianto termale.

I dati sul rischio idrogeologico indicano infatti che il sito è stato edificato su aree a pericolosità idraulica Hi1 e soprattutto Hi4, quest'ultima con tempi di ritorno di 50 anni. La presenza di due *Trullissatio* (ciclo d'intonacatura IV?) indica probabilmente il tentativo di creare uno strato impermeabilizzante definitivo in seguito all'ennesima alluvione.

Prima serie stratigrafica (p)

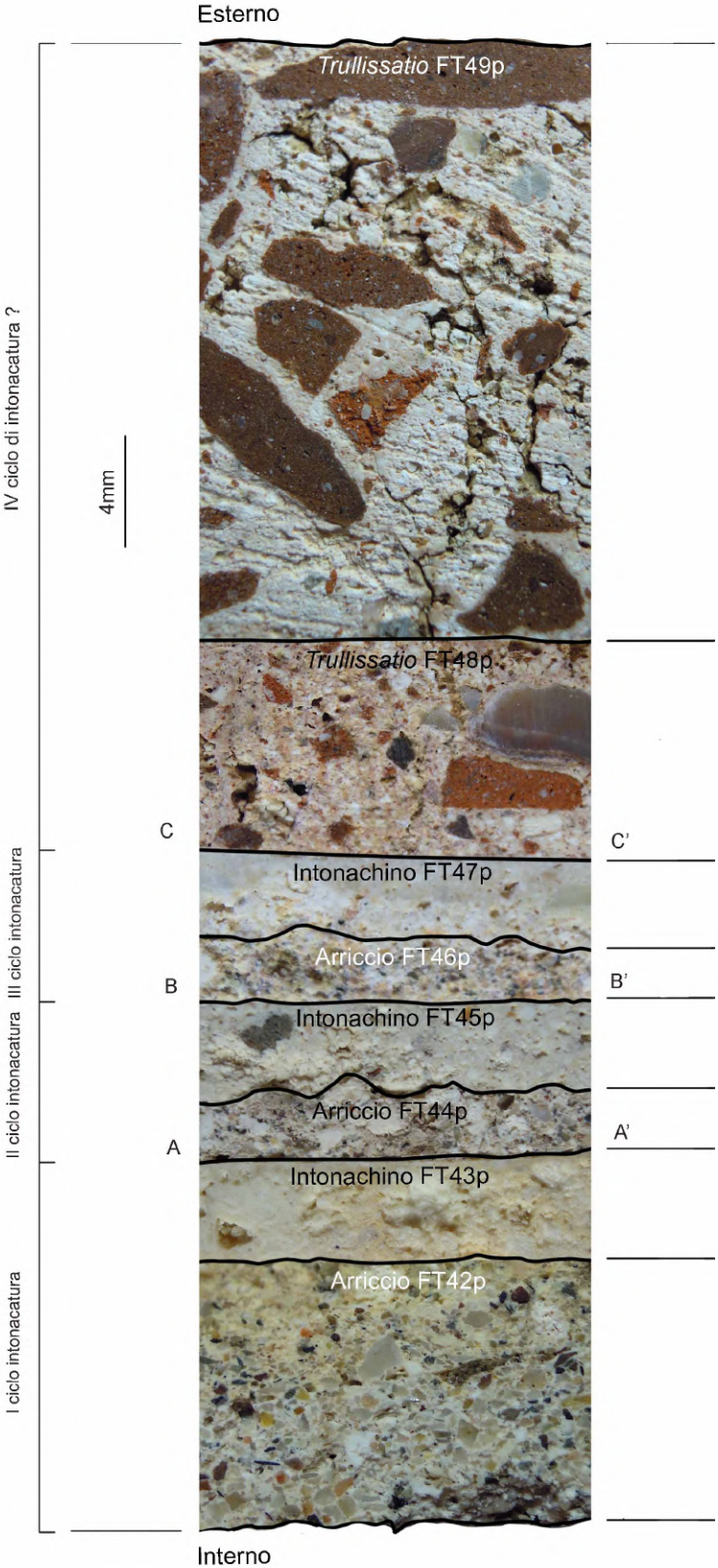


Figura 10.8.1: Prima serie stratigrafica (p)

In tempi recenti, l'ultimo episodio che ha comportato un allagamento del sito archeologico, seppur lieve, è documentato in data 2 maggio 2018, a seguito della quale l'area archeologica rimase chiusa per alcuni giorni.

La seconda serie stratigrafica, campionata in una cisterna (Fig. 10.8.2), offre interessanti informazioni sui metodi e tecnologie d'impermeabilizzazione dei serbatoi d'acqua. La serie è composta da due strati di *Trullissatio* (FT52s, FT53s), un arriccio (FT54s) e un intonachino (FT55s).

Le analisi granulometriche effettuate su ogni campione della serie, e mostrati in Tab. 10.3.1, indicano un aumento dei rapporti L/A da FT52s a FT55s, parallelamente ad una diminuzione delle dimensioni medie dell'aggregato. Si va da un rapporto L/A di 0,23 in FT52s per terminare con un rapporto di 18,92 nel campione FT55s.

La granulometria è varia in FT52s, 53s e 54s, mentre è strettamente uniforme nell'intonachino FT55s (Tab. 10.3.3). Perciò, le dimensioni degli aggregati decrescono dall'interno verso l'esterno della serie stratigrafica. Il trattenuto è molto elevato ai setacci di 2000-4000 μm in FT52s e 2000-500 μm (bimodale) in FT53s. In FT54s il trend granulometrico decrescente sembra non esserci e si rileva un trattenuto particolarmente grossolano concentrato al setaccio di 4000 μm .

Gli strati impermeabilizzanti terminano con l'intonachino FT55s caratterizzato da una granulometria piuttosto fine dell'aggregato, concentrata al setaccio di 125 μm .

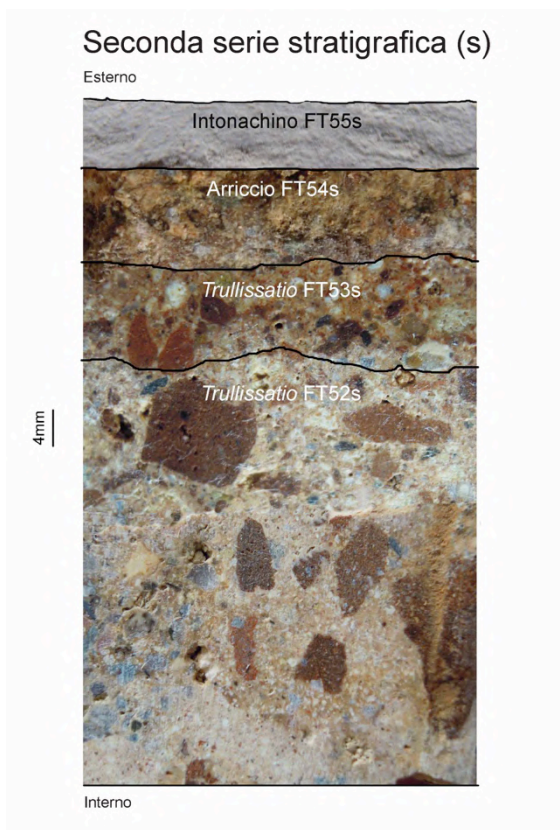


Figura 10.8.2: Seconda serie stratigrafica (s)

Le alterazioni e le degradazioni dei materiali lapidei *in situ*

11.1 Introduzione

Secondo le Raccomandazioni Nor.Ma.L 1/88 per alterazione s'intende "una modificazione del materiale lapideo che non implica necessariamente un peggioramento delle sue caratteristiche sotto il profilo conservativo", mentre il termine degradazione suggerisce una modificazione che implica sempre un peggioramento. Le variabili climatiche e geochimiche che influenzano i processi di weathering sono la temperatura, l'umidità atmosferica, il tasso di evaporazione, la quantità e durata delle piogge, il loro pH e la composizione dei gas atmosferici naturali ed antropogenici.

In ambito petrografico e/o architettonico le differenti tipologie di alterazioni e degradazioni, individuate dalle Raccomandazioni Nor.Ma.L - 1/88, sono riportate all'interno dell'Abaco Dei Degradi, documento con lo scopo di fornire indicazioni utili nella realizzazione delle cartografie di degrado presenti in questo capitolo.

L'abaco dei degradi descrive le principali cause dei fenomeni di degradazione ed alterazione, indicando una simbologia grafica (retini), o cromatica con la quale le forme di degrado vengono correttamente indicate nelle relative cartografie.

Nell'Abaco è possibile distinguere principalmente 15 tipologie conosciute di fenomeni di degradazione/alterazione riguardanti i lapidei da costruzione (pietre) descritti nella tesi.

Alterazione cromatica:

E' un processo che comporta una variazione dei parametri originali del colore di un materiale e si riconduce a vari fenomeni quali, ad esempio i processi di foto-ossidazione di minerali cromogeni esposti alle condizioni atmosferiche, presenza di microorganismi, comparsa di efflorescenze etc. Inoltre, la variazione di colore può essere indotta dalla reazione chimica ad opera di particolari reagenti contenuti nei prodotti restauranti.

Alveolizzazione:

Le cause sono dovute a fenomeni di aggressione meteorica che agiscono meccanicamente sulla superficie dei materiali causandone il distacco. Uno dei fenomeni più comuni si manifesta con la formazione di docce interconnesse con dimensione e forma variabile. Le cause sono dovute a movimenti di soluzioni saline nel substrato che, una volta soggette ad evaporazione, fanno sì che i sali depositati esercitino una pressione di cristallizzazione nel sistema poroso del materiale. In casi

subordinati l'azione del vento predominante, specie se secco, aumenta il fenomeno dell'alveolizzazione per via di una rapida evaporazione delle superfici con conseguente riprecipitazione di sali. Tale forma di degrado condiziona fortemente la durabilità delle pietre, specialmente quando utilizzate come materiale da costruzione.

Crosta:

Strato di alterazione che consiste nel deposito di materiale sulle superfici lapidee. Le cause della formazione delle croste sono differenti. Sono associate all'interazione dell'acqua con le superfici, all'azione di biodeteriogeni e soprattutto sono dovute ai residui di combustione di petroli e derivati (molto comune in aree urbane). Inoltre, le incrostazioni sono la conseguenza del sovradosaggio di prodotti restauranti, spesso anche incompatibili. Il loro colore varia in base alla loro stessa composizione chimica.

Erosione differenziale:

E' dovuta all'azione meccanica di acqua meteorica, vento, urti ed abrasioni. Consiste essenzialmente nell'erosione differente che si verifica tra due litotipi con diverse caratteristiche fisico-meccaniche (e.g. basalto vs marna) oppure all'interno di uno stesso litotipo con caratteristiche di elevata eterogeneità (andesite, ignimbrite).

Deposito superficiale:

Accumulo di materiali estranei di varia natura quali ad esempio polvere, terriccio o guano. Di spessore variabile, tale deposito presenta contatto abrupto e scarsa aderenza col litoide o malta sottostanti. La sua quantità dipende primariamente dalla scabrosità della superficie di deposizione e dal quantitativo di materiale in sospensione aerea.

Disgregazione granulare, polverizzazione:

Decoesione caratterizzata dal distacco di cristalli e/o granuli.

Le cause sono strettamente legate al tipo di roccia, possono essere biologiche, infiltrazioni di acqua di risalita capillare, reazione fra materiale litoide ed atmosfera e degrado all'interfaccia laterizio-malta.

Efflorescenza:

Formazione di composti salini potenzialmente dannosi presenti sulla superficie del materiale. Queste derivano da sali presenti al momento dell'evaporazione della soluzione acquosa circolante

all'interno del materiale lapideo. Inoltre, potrebbero agire all'interno dello spazio dei pori sotto differenti condizioni climatiche e microclimatiche (es. temperatura, umidità relativa, azione del vento etc.) esercitando delle azioni dannose.

Erosione:

Asportazione di materiale in superficie dovuto a cause di natura diversa quali azione meccanica della pioggia, disgregazione delle superfici concave dei conci da parte del vento, aggressione chimica d'inquinanti (e.g. NO_x, SO_x od ammoniacali), formazione di ghiaccio negli strati più superficiali (gelo e disgelo). L'erosione determina quindi il rapporto relativo delle particelle costituenti e la tessitura dei materiali, i quali sono parametri che condizionano le proprietà meccaniche e le qualità tecniche dei materiali.

Esfoliazione:

Degradazione dovuta al distacco di strati di materiale parallelamente alla superficie ("sfoglie").

Patina:

Alterazione limitata alla porzione più superficiale del materiale dovuta a modificazioni naturali. La patina è riconducibile a fenomeni come la variazione di colore del materiale che agisce con la radiazione solare, umidità, temperatura etc. Nel caso di alterazioni simili, ma prodotte artificialmente, si usa il termine "patina artificiale".

Patina biologica:

Sottile strato morbido ed omogeneo aderente alla superficie lapidea. Può presentare spessori centimetrici e colorazioni talvolta verdi, talvolta brune o nere. La patina biologica solitamente funge da strato aderente per terriccio, polvere atmosferica ed addirittura smog. Le cause sono dovute alla presenza di abbondante umidità, ristagni di acqua e scabrosità della superficie lapidea.

Pellicola:

Strato coerente estraneo al materiale, molto superficiale e di spessore ridotto. Può essere dovuta al trattamento dei materiali con sostanze derivanti da trattamenti conservativi progressi, spesso protettivi di natura organica. La pellicola, in origine normalmente trasparente, subisce col tempo un chiaro cambiamento di colore presentando fenomeni di ossidazione.

Pitting:

Degradazione puntiforme che si manifesta attraverso la formazione di docce cieche ravvicinate di forma cilindrica e con dimensione massima di alcuni millimetri di diametro. Interessa soprattutto le rocce tenere quali marmi o calcari. Le docce del pitting sarebbero dovute a solchi causati dall'azione dell'apparato radicale di muschi e licheni presenti sulla superficie in passato ed ora scomparsi.

Presenza di vegetazione:

Descritta come la presenza sulla superficie del lapideo di piante superiori. E' legata alla tipologia del substrato ed alla umidità superficiale.

Mancanza:

Con il termine mancanza s'intende la totale assenza di una porzione di muratura, concio od elemento artistico. È un fenomeno molto comune sugli edifici storici ed è dato principalmente dall'azione meccanica di un urto. Secondariamente la mancanza è data da soluzioni di continuità conseguenti agli stress termici tra rocce differenti o tra rocce e innesti di elementi metallici nella struttura muraria. In parte può essere provocata da errori di posa in opera e l'utilizzo di materiali non consoni.

11.2 Rocce sedimentarie: calcari della serie carbonatica di Cagliari ed arenarie

Le rocce calcaree sono variamente utilizzate nella realizzazione della Basilica di San Saturnino, rivestendo, sia un ruolo importante nelle strutture portanti, sia nelle opere decorative o di rivestimento.

Come da Capitoli precedenti, i calcari utilizzati nella costruzione della Basilica di San Saturnino, sono delle biomicriti (pietra Cantone) e delle biolititi (pietra Forte).

La pietra Cantone presenta un'ampia varietà di degradazioni/alterazioni. Ciò è dovuto alle sue caratteristiche fisico-meccaniche. Su monumento i campioni analizzati presentano, infatti, una porosità totale media piuttosto alta pari a 23,5%, un coefficiente d'imbibizione medio di 8,7% ed un indice di saturazione medio di 88,6% (Tab. 8.2.1.1, Capitolo 8).

La permeabilità della roccia avviene principalmente per porosità in un intervallo da scarsamente permeabile ad impermeabile (Pala 1997). Le permeabilità a vapore acqueo medie risultano pari a 63,10 g/m²g (Columbu et al. 2017).

L'altezza media di risalita capillare su pietra Cantone rilevata in monumento è pari a 1,2 m mentre la trasmissività della roccia è pari a 1,7·10⁻³ m³/s (Pala 1997).

Le caratteristiche meccaniche della pietra su monumento sono discrete con I_{s50} medio = 1,18 MPa e relative resistenze a compressione e trazione medie pari a 16,51 e 1,47 MPa (Tab. 8.2.1.3, Capitolo 8).

I dati relativi alle velocità ultrasoniche nella pietra Cantone prelevata da cava (Tab. 14.2.2.4 Capitolo 14), indicano una V_p media = 2884 m/s in accordo con i dati ottenuti da Cuccuru et al. (2014).

Proprio per le sue caratteristiche di elevate porosità ed elevata capacità di ritenzione, la pietra Cantone, sebbene sia un materiale con elevata lavorabilità, è soggetta a una vasta gamma di degradi ed alterazioni.

La cartografia di degrado sul paramento murario del cortile esterno (Basilica di San Saturnino, Fig. 11.2.2), mostra come la pietra Cantone presenta alterazioni cromatiche, patine biologiche, mancanze, alveolizzazioni, pitting e disgregazioni granulari.

L'alterazione cromatica è localizzata sulle superfici di percolazione delle acque meteoriche provenienti dalle sommità del paramento murario. La zona di alterazione cromatica comprende un'area di deposizione di particolato atmosferico, sporcizia e guano lisciviato. Sul monumento la deposizione di sporcizia è inoltre facilitata dalla scabrezza della superficie parzialmente alterata con JRC (coefficiente di rugosità) medio pari a 3.

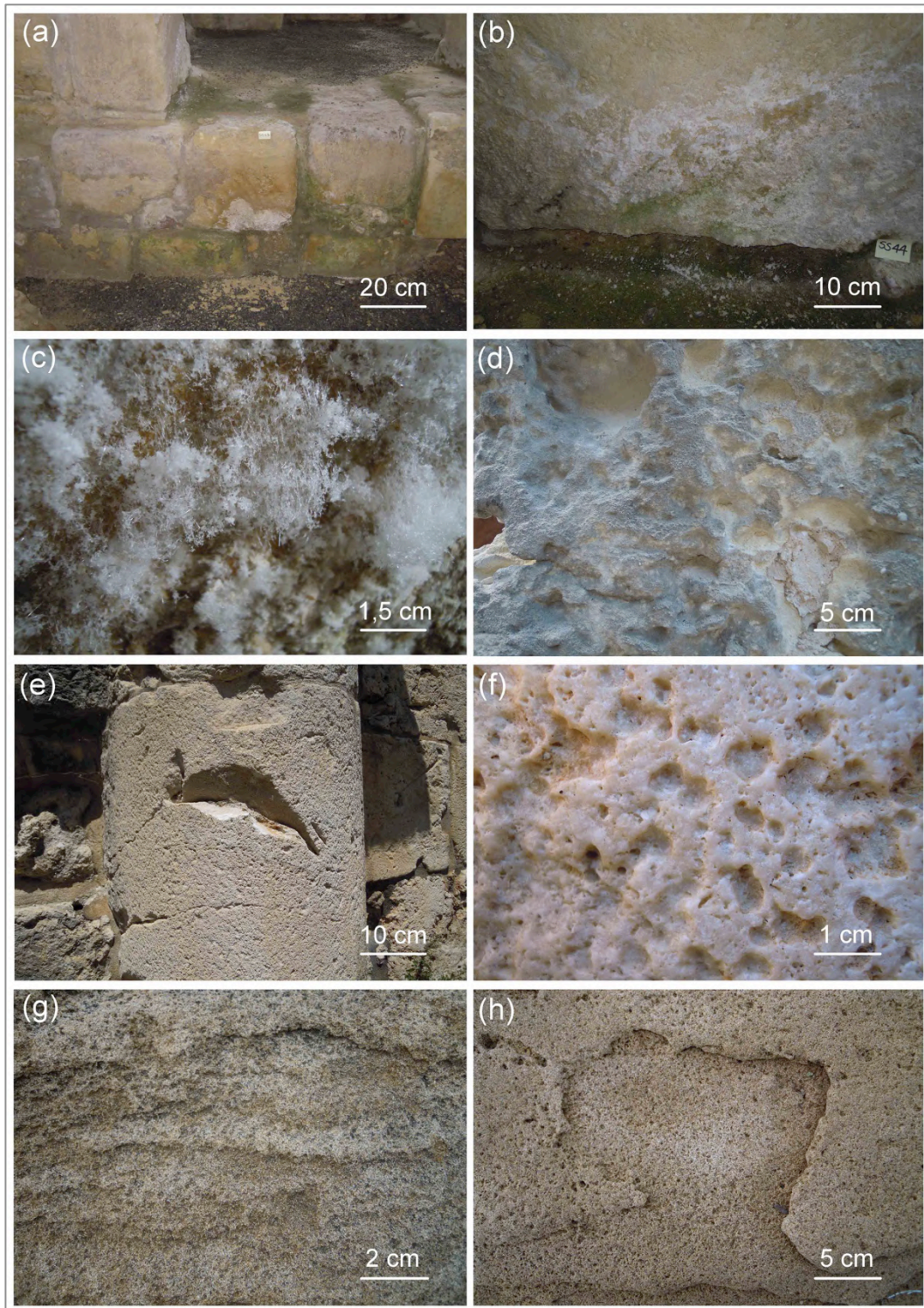


Figura 11.2.1: Degradazioni ed alterazioni sui calcari della Basilica di San Saturnino e sulle arenarie di Tharros: (a) patine biologiche su pietra Cantone nello scavo archeologico del transetto, (b) efflorescenze su alcuni conci di pietra Cantone, (c) efflorescenze di Thenardite (Na_2SO_4) e Mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) su pietra Cantone, (d) docce di alveolizzazione sulla pietra Cantone, (e) mancanza derivata dal distaccamento di una porzione di colonna (pietra Forte), (f) processo di pitting su concio in pietra Forte, (g) disgregazione granulare su arenaria, (h) esfoliazione su arenaria. Foto di Fabio Sitzia.

L'analisi di tale sporcizia ha rilevato la presenza delle fasi carbonato-idrossiapatite $\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3(\text{OH})$, e clinofosinaite $\text{Na}_3\text{Ca}(\text{SiO}_3)(\text{PO}_4)$, entrambe associate alla presenza di guano (Columbu et al. 2019).

La presenza di patine biologiche tipo muschi/licheni è localizzata sulle superfici basse del monumento in presenza di zona di risalita capillare e nella parte interna della Basilica in corrispondenza dello scavo del transetto (Fig. 11.2.1a).

Frequenti sono le mancanze, causate principalmente dalla caduta di ampie porzioni di conci principalmente per effetto di uno sfarinamento profondo, secondariamente a causa di un danno meccanico. Sulla parete del cortile esterno è inoltre presente un degrado per alveolizzazione (Fig. 11.2.2) che si manifesta attraverso la formazione di docce a fondo convesso e dimensioni variabili dovute alla principalmente all'esposizione al vento predominante (Maestrale). Le cavità sono distribuite in maniera non uniforme sulla superficie e presentano la caratteristica di essere interconnesse fra loro (Fig. 11.2.1d).

Le diffrazioni sulle malte della Basilica di San Saturnino (Fig. 8.4.1, Tab. 8.4.1), indicavano la presenza di gesso, prodotto con tutta probabilità da attacco solfatico esterno EAS (External Sulfate Attack) dovuto in parte da aerosol marino ed in parte da emissioni antropiche.

Come nelle malte, processi di solfatazione della matrice carbonatica sono stati identificati in microscopia elettronica sulla stessa pietra Cantone come dimostrato dalla mappatura SEM-EDS di Fig. 8.6.1.1c.

Un altro degrado molto comune, rilevato sulla pietra Cantone, è la disgregazione granulare/polverizzazione (Fig. 11.2.2).

È dovuto alla lisciviazione da parte di acque meteoriche con pH aggressivi della matrice carbonatica di cui sono costituite queste rocce. Tale lisciviazione porta ad una progressiva solfatazione della matrice carbonatica della roccia con trasformazione della frazione carbonatica in solfati quali il gesso.

La disgregazione granulare della pietra Cantone si nota soprattutto nelle estremità dei conci dove è evidente un arrotondamento progressivo dello spigolo vivo. Esperimenti portati avanti all'interno della Basilica San Saturnino durante il dottorato, tra il 2016 ed il 2019, mediante trappole di cattura del residuo da decoesione con superficie di 468 cm², hanno registrato un accumulo di materiale di circa 65 g ovvero 470 g/m² anno al fronte di una parete di 5,5 m di altezza.

L'analisi in microscopia elettronica SEM-SE del materiale granulato ha evidenziato una granulometria classata con $\Phi = 30 \mu\text{m}$ in un intervallo $10 < \Phi < 100 \mu\text{m}$.

Sebbene non presenti sulla superficie esterna riportata in Fig. 11.2.1, efflorescenze sulla pietra Cantone sono invece presenti nella parte interna dell'edificio (Fig. 11.2.2b, c).

L'analisi di tali efflorescenze mediante tecnica XPRD dimostra la presenza di Thenardite (Na₂SO₄) e Mirabilite (Na₂SO₄ · 10H₂O), due solfati che si originano in particolari microclimi caratterizzati da elevata umidità, solitamente ciclica (stagionale). Entrambe fasi molto solubili, si trasformano

vicendevolmente l'una nell'altra al mutare delle condizioni termo-igrometriche (Columbu et al. 2019). Hanno la caratteristica di poter variare volume quando perdono o acquistano molecole d'acqua di cristallizzazione, producendo così notevoli pressioni che possono compromettere l'integrità della roccia causando così fratture di notevole entità al suo interno.

La pietra Forte, calcare massivo e fortemente organogeno, presenta una particolare resistenza all'alterazione che è dovuta in *primis* alle sue caratteristiche di compattezza. Come visibile dai Capitoli precedenti, in monumento la pietra Forte presenta una porosità totale media piuttosto bassa, pari a 10,2%, un coefficiente d'imbibizione medio di 2,7% ed un indice di saturazione medio di 92,1% (Tab. 8.2.1.1, Capitolo 8). Come rilevato da Pala (1997), il materiale presenta un'elevata permeabilità per fessurazione/carsismo con trasmissività T pari a $0,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. La permeabilità per porosità è invece piuttosto scarsa, come dimostrato dall'altezza di risalita capillare *in situ* pari a 8 cm massimo.

In monumento, la pietra Forte è priva di degradazioni derivanti dall'usura e dall'urto meccanico, poiché possiede ottime caratteristiche meccaniche quali I_{s50} medio = 3,27 MPa con relative resistenze a compressione e trazione medie pari a 49,36 e 4,09 MPa (Tab. 8.2.1.3, Capitolo 8).

Come dimostrato in Tab. 14.2.2.4, la pietra Forte in affioramento mostra una velocità media V_p delle onde compressionali pari a circa 5512,5 m/s ad indicare un materiale fortemente coeso, poco alterato e con ottime caratteristiche di resistenza meccanica.

Gli unici fenomeni di degradazione/alterazione osservati sulla pietra Forte sono dovuti alla presenza di depositi superficiali quali accumuli di polvere e particolato atmosferico, pitting (Fig. 11.2.1f) e mancanze (Fig. 11.2.1e). Un processo di pitting è localizzato sulla superficie di un concio a circa 2 m di altezza sulla porzione sinistra della muratura di Fig. 11.2.2. Il pitting è già noto in letteratura e secondo alcuni autori (Del Monte 2005, Nylander 1866), sarebbe legato all'azione erosiva dell'apparato radicale dei licheni. Questi ultimi, in questa porzione di roccia sono ora assenti ad indicare probabilmente un mutamento delle condizioni ambientali di sopravvivenza degli stessi. La stabilità linfatica dei licheni è, infatti, basta sulle condizioni d'insolazione del luogo e dalla qualità dell'aria (presenza di composti di Zolfo in particolare di SO_2). Quest'ultimo composto causa, attraverso un processo di ossidazione della clorofilla dell'alga, una forte diminuzione della fotosintesi e della respirazione della stessa (Haffner et al. 2001). La pietra Forte inoltre presenta croste e alterazioni cromatiche derivanti dalle acque di percolazione e dall'accumulo di particolato smog. A Cagliari la pulizia degli edifici in pietra Forte avviene in media ogni 15 anni per portare la pietra alla sua colorazione bianca originale.

Le arenarie, utilizzate nei monumenti di Tharros, sono materiali facilmente lavorabili e cavabili che hanno inoltre il vantaggio di essere reperibili lungo la costa e potevano perciò essere facilmente

trasportati per via marina. Il materiale ha delle caratteristiche fisiche piuttosto variabili di *facies* in *facies* a causa del diverso grado di cementificazione e della granulometria dei clasti che, in alcuni casi, conferiscono all'arenaria delle caratteristiche di breccia.

Da Tab. 9.2.1 Capitolo 9, si nota come la porosità aperta all'elio dell'arenaria sia pari a 35,2% a fronte di un coefficiente d'imbibizione $CI_w = 17,3\%$ ed un indice di saturazione S.I. = 84,7%.

Le caratteristiche meccaniche della roccia in monumento variano in base alla granulometria e, per la *facies* in studio, mostrano un indice di resistenza media al punzonamento di $I_{s50} = 0,25$ MPa con resistenze a compressione e trazione medie di 3,52 e 0,31 MPa rispettivamente (Tab. 9.2.3, Capitolo 9).

La caratterizzazione ultrasonica sulle arenarie di cava (Tab. 14.2.2.4), dimostra che la velocità della perturbazione elastica compressionale (V_p) media è pari a 4061 m/s.

L'alterazione dell'arenaria avviene soprattutto col fenomeno della disgregazione granulare Fig. 11.2.1g.

Un secondo importante processo di degrado è l'esfoliazione della roccia che produce il distacco di "foglie" subparallele alla superficie della stessa pietra (Fig. 11.2.1h), di dimensioni sino a 20 cm di lunghezza e 2,5 cm di spessore. Il fenomeno dell'esfoliazione del materiale in monumento si traduce in un progressivo arretramento della superficie muraria.

L'esfoliazione è enfatizzata quando in un concio la stratificazione della roccia è parallela alla superficie esterna dello stesso. La causa dell'esfoliazione, come già in precedenza accennato, è dovuta agli affetti della risalita capillare e da dilatazioni termiche di tipo lineare e volumetrico.

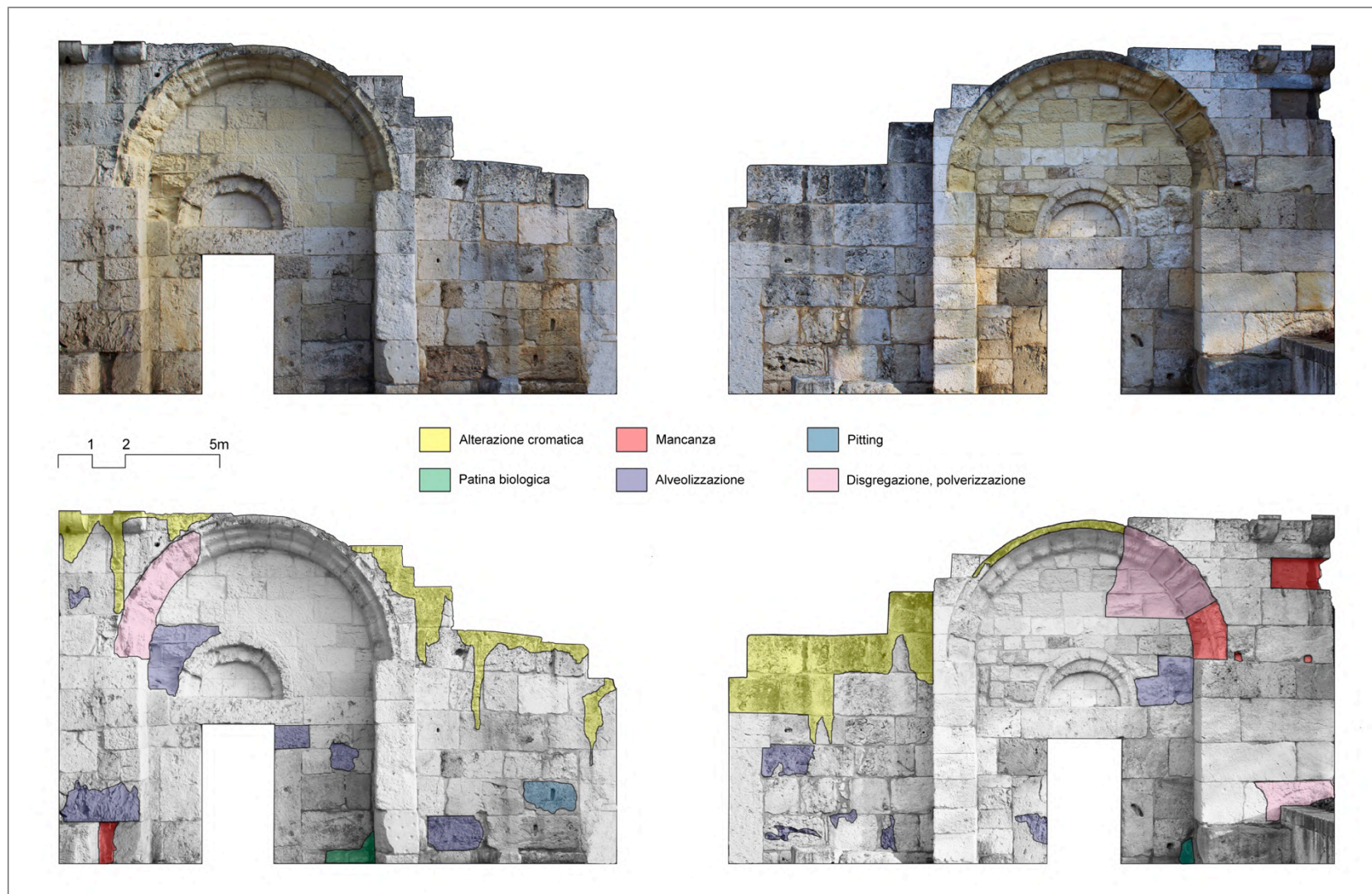


Figura 11.2.2: Cartografia di degrado Nor.Ma.L - 1/88 del paramento murario cortile esterno, (Basilica di San Saturnino) esposizione WNW.
Elaborazione grafica di Fabio Sitzia

11.3 Rocce vulcaniche: rioliti, daciti, riodaciti, basalti ed andesiti

Le rioliti e le riodaciti (ignimbriti) dell'area di Fordongianus sono utilizzate nell'edificazione delle antiche Terme di *Forum Traiani*.

Si tratta di litotipi con diverso grado di saldatura, generalmente medio e in alcuni casi elevato. Questa caratteristica si può notare osservando gli indici di punzonamento della roccia in monumento, variabili in un intervallo $1,16 < I_{S50} < 2,77$ con media di 1,53 MPa e relative resistenze a trazione e compressione medie pari a 17,16 e 1,53 MPa (Tab. 10.2.3).

La circolazione dell'acqua in queste rioliti e riodaciti avviene principalmente per porosità.

Nelle rocce del monumento, si registra una porosità efficace media pari a $35,7 \pm 1,98\%$. Il coefficiente d'imbibizione medio e l'indice di saturazione medio sono pari a 19,1% ed 87,0% (Tab. 10.2.2).

La circolazione dell'acqua nella pietra è anche in questo caso uno dei principali fenomeni responsabile di degradazioni/alterazioni *in situ*, come quelli mostrati nella cartografia di Fig. 11.3.1 dove è rappresentata un'ampia porzione di struttura appartenente alla *Natatio*.

Sulle ignimbriti dell'area di Fordongianus-Traiani si assiste ad una alterazione cromatica causata da deposizioni di materiale in carico alle acque di percolazione provenienti dalle parti superiori della struttura (Fig. 11.3.1).

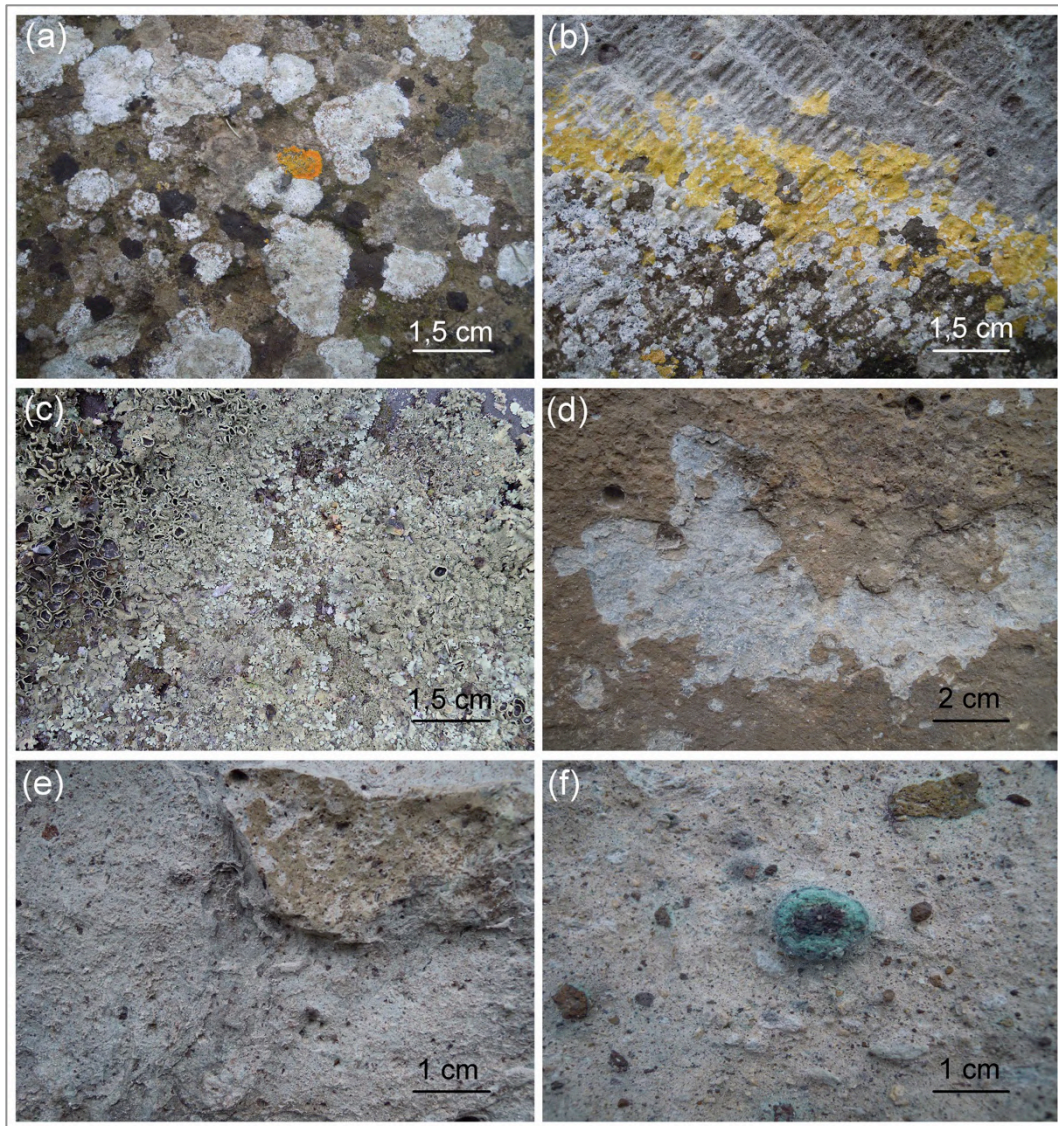
La presenza di patine biologiche è localizzata nella zona bassa del paramento murario, dove l'esposizione a Nord e la continua bagnatura da parte di acque termali, crea l'ambiente ideale alla proliferazione di alghe acquatiche, muschi e licheni (Fig. 11.3.2a, b, c). Si assiste inoltre alla presenza di piante superiori del genere *Parietaria* e *Tarassaco* (*Parietaria Judaica*, *Taraxacum Officinale*).

Il processo dell'esfoliazione dell'ignimbrite è localizzato nelle parti basse dei pilastri delle arcate (Fig. 11.3.1). Il distacco di porzioni di materiale sino a 10 cm di lunghezza e spessori di 0,5 cm avviene, questa volta, per via della risalita capillare di acque termali ad alto contenuto salino provenienti dalla vicina vasca. La risalita capillare causa l'esfoliazione non solo del paramento murario della *Natatio* ma anche delle strutture non musealizzate presenti vicino alla risorgiva esterna al sito (Fig. 11.3.2d, e).

Sull'ignimbrite si verifica spesso il degrado per erosione differenziale tra pasta di fondo pomiceo-cineritica e inclusi (e.g. cognati, xenoliti, Fig. 11.3.2f). Il processo consiste in un arretramento della parete a causa dell'erosione della pasta di fondo, caratterizzata da una coesione modesta, ed una contemporanea enucleazione degli inclusi caratterizzati invece da una resistenza meccanica di solito più elevata.



Figura 11.3.1: Cartografia di degrado Nor.Ma.L - 1/88 del paramento murario *Frigidarium* (Forum Traiani), esposizione N.
Elaborazione grafica di Fabio Sitzia



11.3.2: Degradi ed alterazioni sulle rioliti e riolaciti (ignimbriti) del Forum Traiani: (a, b, c) patine biologiche di muschi e licheni su superfici aggettanti, (d) processo di esfoliazione nelle zone basse dei pilastri di sostegno, (e) processo di esfoliazione con conseguente argillificazione della superficie sottostante le “foglie”, (f) erosione differenziale matrice pomiceo/cineritica – inclusi con conseguente enucleazione degli stessi. Foto di Fabio Sitzia.

Nelle andesiti e nei basalti di Tharros si riscontra una gamma di alterazioni/degradazioni piuttosto ristretta dovuta alle caratteristiche meccaniche del materiale. Le analisi dimostravano, infatti, come le rocce presentano un indice di resistenza al punzonamento medio particolarmente elevato e pari a 8,82 MPa con relative resistenza a compressione e trazione di 187,90 MPa e 11,02 MPa (Tab. 9.2.3).

Sui basalti prelevati da affioramento la velocità della perturbazione elastica compressionale (V_p) media è pari a 4976 m/s (Tab. 14.2.2.1).

La circolazione dell'acqua nella roccia è influenzata da un coefficiente d'imbibizione anch'esso piuttosto basso compreso in un intervallo $2,5 < C_{iw} < 8,5\%$ con media di 4,7% (Tab. 9.2.1).

La serie dei parametri indicati sopra suggerisce un materiale fortemente resistente in cui si rilevano solo patine biologiche come coperture di muschi e licheni (Fig. 11.3.3a, b).

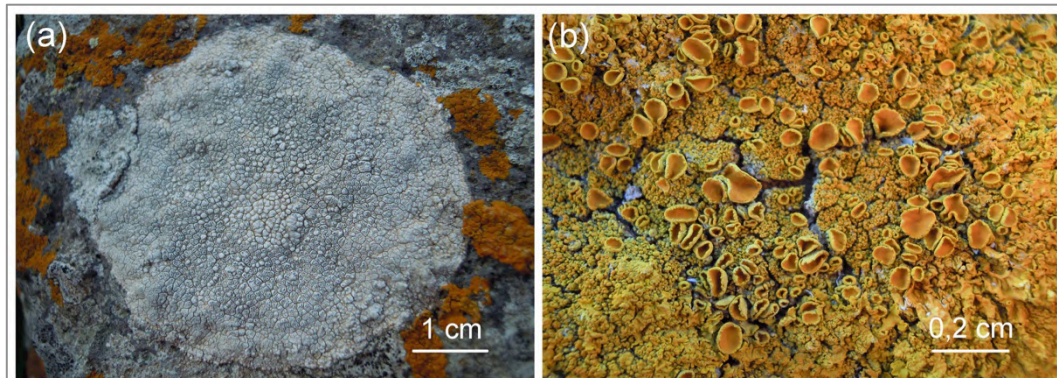


Figura 11.3.3: Degradati ed alterazioni su basalti ed andesiti: (a) patine biologiche sulla superficie di un basalto (Tharros), (b) patine biologiche sulla superficie di una andesite (Tharros). Foto di Fabio Sitzia.

Le daciti/riodaciti utilizzate nel Teatro di Nora presentano diverse caratteristiche di compattezza che le rendono più o meno resistenti agli agenti atmosferici. Le caratteristiche fisiche della roccia di cava (Su Casteddu), mostrano una resistenza a punzonamento di 7,16 MPa con conseguenti resistenze a compressione e trazione di 143,13 e 8,95 MPa (Tab. 14.2.2.1).

La velocità della perturbazione compressionale (V_p) all'interno del litotipo è pari a 4603 m/s.

La circolazione dell'acqua nella roccia avviene prevalentemente per fessurazione e, secondariamente, per porosità.

La roccia presenta spesso coperture di muschi e licheni ma è soggetta anche al degrado legato ad alveolizzazione, fratturazione, esfoliazione ed erosione differenziale.

11.4 Rocce metamorfiche: marmi Apuano-Lunensi

Il marmo Apuano-Lunense, chiamato generalmente marmo di Carrara, è un materiale estremamente lavorabile che presenta delle ottime caratteristiche fisiche che gli consentono di resistere ad una vasta gamma di alterazioni e degradazioni.

I dati fisico-meccanici dei marmi Apuano-Lunensi sono riferiti ai campioni prelevati in segheria, poiché non è stata eseguita una caratterizzazione fisica sui marmi prelevati in monumento.

La roccia è caratterizzata da una porosità efficace media piuttosto bassa, pari a 4% con un coefficiente d'imbibizione medio, anch'esso basso, uguale a 1,2% (Tab. 14.2.1.6).

L'indice di saturazione della roccia presenta media di 75,8 (Tab. 14.2.1.6).

Il marmo di Carrara è caratterizzato da ottime resistenze meccaniche con indici di punzonamento di 3,18 MPa (Tab. 14.3.1). Come da bibliografia, altri dati di caratteristiche meccaniche dei Lunensi-Carrara sono un carico di flessione pari a 13,5 MPa, una rigidità $R = 21700$ MPa, una durezza Knoop $K_i = 1,463$ MPa ed un coefficiente di espansione termica lineare piuttosto basso individuato in $6,3 \pm 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (Coli 1995, Corrotti & Criscuolo 1992).

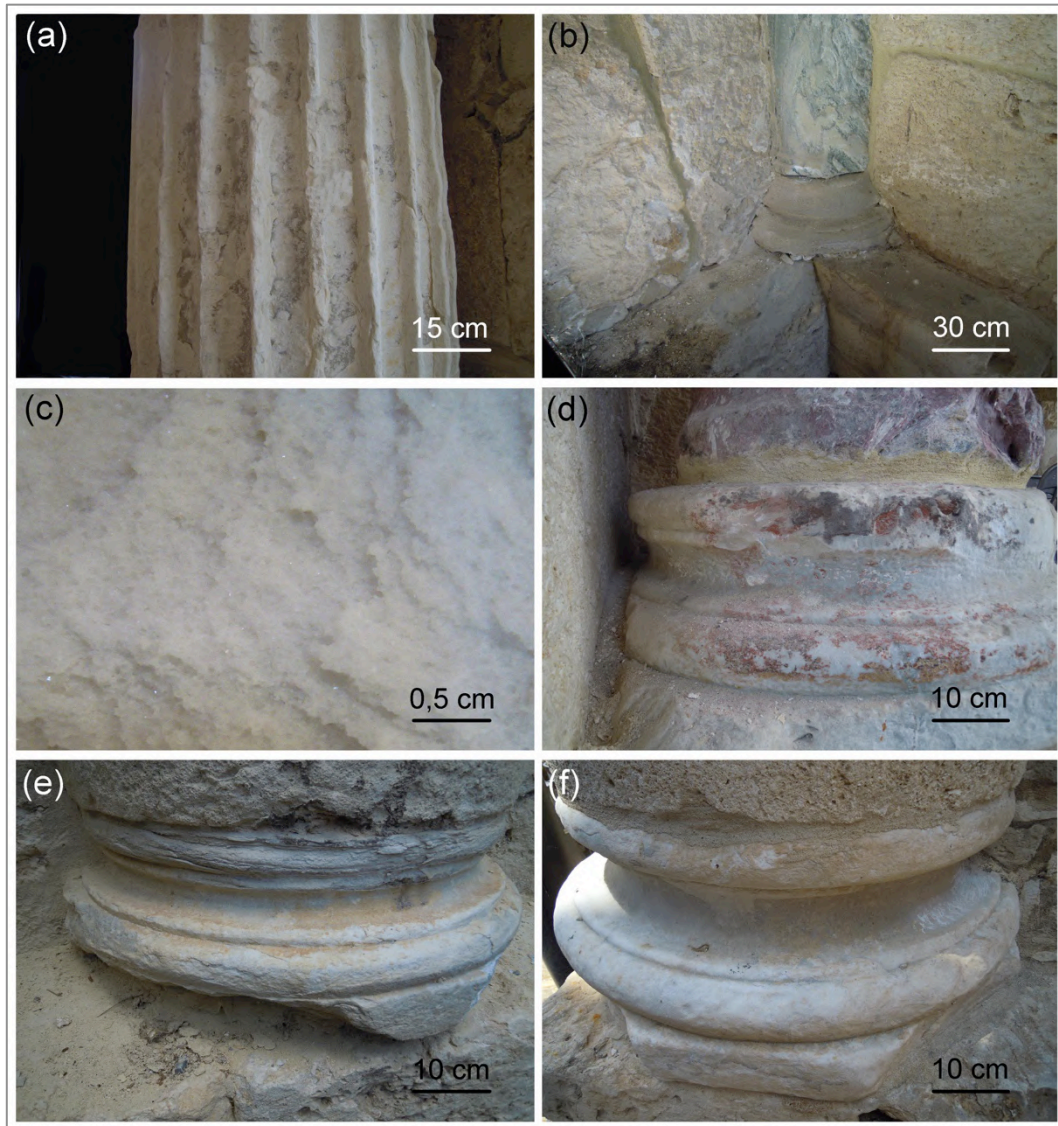
I dati ultrasonici del materiale mostrano una velocità media dell'onda compressionale $V_p = 5406$ m/s (Tab. 14.2.2.4), in accordo con i valori ottenuti da Siegfried & Ruedrich (2004).

Il marmo di Carrara soffre principalmente del fenomeno di Crystal Sugar Corrosion (CSC, Grillo & Prochaska 2014, Columbu et al. 2018), che consiste nella decoesione granulare dei microcristalli calcitici-sparitici (Fig. 11.4.1a, b, c). Il processo provoca un residuo da decoesione bianco a grana fine simile allo zucchero (saccarosio) da cui deriva appunto il nome Crystal Sugar Corrosion.

Il CSC avviene principalmente per effetto della solfatazione esterna sul marmo (External sulphate attack).

Altre tipologie di degradazioni/alterazioni del marmo sono la presenza sulla superficie della roccia di patine biologiche come da Fig. 11.4.1d. Tali patine di colorazione rossa interessano le superfici marmoree poste nelle zone interne del monumento ed il loro colore è conferito dal β -carotene ($\text{C}_{40}\text{H}_{65}$) prodotto da alcuni tipi di batteri quali *Arthrobacter sp.*, *Rubrobacter sp.* e *Rhodotorula sp.* (Rosado et al. 2014, Sterfilinger & Pinzani 2012). Altre patine superficiali sui marmi riguardano la formazione di croste di ossalati di calcio (Fig. 11.4.1e, f).

La formazione di ossalato di calcio sotto forma di Weddellite ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e Whewellite ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) avviene ad opera di muffe della varietà *Aspergillus niger* al fine di creare un substrato favorevole alla loro crescita e proliferazione (Monte & Bianchini 2006).



11.4.1: Degradi ed alterazioni sui marmi della Basilica di San Saturnino: (a, b, c) processo di solfatazione e conseguente Crystal Sugar Corrosion (CSC) sulla superficie di alcune colonne portanti, (d) patina biologica di colorazione rossastra ad opera di batteri *Arthrobacter sp.*, *Rubrobacter sp.* e *Rhodotorula sp.*, (e,f) copertura di croste giallo chiaro di ossalato di calcio sui basamenti delle lesene del cortile esterno. Foto di Fabio Sitzia

Il trattamento del dato meteorologico ed il settaggio delle camere climatiche

12.1 Trattamento dei dati climatici

Durante il trattamento dei dati climatici è nata l'esigenza di apportare alcune approssimazioni e medie di alcuni parametri meteorologici. Ciò avviene perché si ha a disposizione una sola camera climatica FITOCLIMA ed una sola camera climatica SOLARBOX, a fronte di materiali lapidei provenienti da quattro zone climatiche, ognuna delle quali caratterizzata da valori di temperatura e umidità relativa differenti, seppur di poco.

Tali medie ed approssimazioni dei dati meteo hanno riguardato solo la temperatura e l'umidità relativa, dal momento che i parametri radiazione solare e contenuto di CO₂ sono gli stessi in ogni zona della Sardegna.

Nel nostro caso, una prima approssimazione riguardava l'applicabilità dei parametri meteo temperatura e umidità relativa di Tab. 4.3.1, 4.3.3, Capitolo 4, relativi alle stazioni di Cagliari-Elmas e Capo Frasca, rispettivamente ai siti archeologici di San Saturnino-Nora e Tharros-Forum Traiani.

Tale approssimazione, ricordiamo, poteva essere fatta in base alla cartografia bioclimatica di Fig. 4.3.1, Capitolo 4, dove l'isobioclima di San Saturnino e Nora era molto simile all'isobioclima della stazione meteorologica Cagliari-Elmas e l'isobioclima di Tharros e Forum Traiani era molto simile all'isobioclima della stazione meteorologica Capo Frasca.

Con tale approssimazione la raccolta dei dati meteo circa 4 zone di ubicazione dei monumenti era stata ridotta a sole 2 (Tab. 4.3.1, 4.3.3, Capitolo 4).

L'impostazione della camera climatica necessita, però, di un solo di un dato di temperatura e umidità relativa per cui è stato necessario calcolare la media aritmetica dei valori dei dati climatici relativi a Cagliari-Elmas (Tab. 4.3.1, Capitolo 4) e Capo Frasca (Tab. 4.3.3, Capitolo 4), riunendoli in un solo database (Tab. 12.1.1), la cui applicabilità, questa volta, può essere estesa a tutti i siti archeologici.

In tale database, si registrano una temperatura massima media annuale di 20,8 °C ed una minima media annuale di 12,6 °C. Le temperature massime medie più elevate si registrano nei mesi estivi (28,3 °C) mentre nei mesi invernali si assiste a valori di 14,2 °C. Le temperature minime medie invece sono di 18,9 °C nel periodo estivo e 7 °C nel periodo invernale. Il record di temperatura massima assoluta è di 42,5 °C mentre il record di temperatura massima assoluta è di -4,8 °C. I

giorni di calura media annuale registrati nel trentennio con $T \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$ sono in totale 33,7 concentrati nei periodi estivi con una media di 4,2 in Giugno 11,8 in Luglio, 13,6 in Agosto e 4,1 in Settembre.

Il numero di giorni di gelo annuali ($T \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$) sono piuttosto esigui (2,1 in totale).

In Tab. 12.1.1 è mostrato come l'umidità relativa dell'aria raggiunga una media di 77% annuo.

Le precipitazioni riflettono un trend di tipo Mediterraneo. Si osserva la presenza di due stagioni principali: una relativa al periodo che va da Ottobre ad Aprile, e l'altra che si estende da Maggio a Settembre. Il passaggio fra le due stagioni è particolarmente marcato fra Settembre ed Ottobre, in corrispondenza del quale si hanno differenze di circa 27 mm. Il massimo cumulato di precipitazione si ha in Novembre con 75,5 mm distribuiti in 8,5 giorni di pioggia mensile. Rilevante è anche l'accumulato nei mesi di Ottobre, Dicembre e Gennaio e Febbraio. Il minimo accumulato di precipitazione è invece registrato nel mese di Luglio con soli 4,3 mm.

Tutti i siti (1971-2000)	Mesi												Stagioni				Anno
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Inv	Pri	Est	Aut	
T. max. media ($^\circ\text{C}$)	13,8	14,0	15,6	17,7	21,9	25,9	29,1	29,8	26,7	22,5	17,8	14,9	14,2	18,4	28,3	22,3	20,8
T. min. media ($^\circ\text{C}$)	6,6	6,7	7,9	9,6	13,1	16,8	19,5	20,4	17,9	14,5	10,3	7,7	7,0	10,2	18,9	14,2	12,6
T. max. assoluta ($^\circ\text{C}$)	19,9	21,2	25,0	27,9	33,9	37,3	42,5	41,5	36,0	33,9	26,5	22,2	21,1	28,9	40,4	32,1	30,6
T. min. assoluta ($^\circ\text{C}$)	-4,8	-2,1	-0,9	1,6	5,7	9,7	12,4	13,5	9,4	5,5	0,0	-2,6	-3,2	2,1	11,9	5,0	4,0
Giorni di calura ($T_{\max} \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2	11,8	13,6	4,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	29,6	4,1	33,7
Giorni di gelo ($T_{\min} \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,9	0,4	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4	1,7	0,3	0,0	0,1	2,1
Precipitazioni (mm)	49,9	56,9	42,4	45,6	29,5	14,3	4,3	7,4	34,6	61,2	75,5	57,0	163,8	117,5	26	171,3	478,6
Giorni di pioggia	7,5	7,5	7,0	7,5	4,5	2,0	1,0	1,0	4,0	7,5	8,5	8,0	23	18,7	4	20	65,7
Giorni di nebbia	2,0	2,0	1,5	1,0	1,5	0,0	1,0	0,5	0,5	1,5	1,5	2,0	6	4	0,6	3,5	14,1
Umidità relativa media (%)	82,0	79,5	78,0	77,0	75,5	72,5	71,5	72,0	74,0	78,5	81,0	82,0	81,2	76,8	72,0	77,8	77,0
Eliofania assoluta (h/g)	4,7	5,8	6,7	7,3	8,7	10,3	14,9	10,2	8,1	6,7	5,0	4,1	4,9	7,6	11,8	6,6	7,7
Vento (km/h)	16,0	16,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,5	16,0	16,0	16,0	16,0	15,0	15,0	15,8	15,5

Tabella 12.1.1: media aritmetica dei dati meteorologici di riferimento delle stazioni di Cagliari-Elmas e Capo Frasca.

Il vento è caratterizzato da una velocità media piuttosto simile in un intervallo tra 15 e 16 Km/h con media annuale di 15,5 Km/h (brezza tesa) e, come riportato in Tab. 4.3.3, ha una frequenza percentuale analoga in tutte le zone della regione Sardegna

Per quanto riguarda i dati di eliofania e radiazione solare necessari per impostare la camera SOLARBOX, ripetiamo, non sono state effettuate medie poiché, come dimostrato dai database AM e da Lavaglini et al. 1987, non si registrano differenze sostanziali di questi 2 parametri climatici di sito in sito. In tutte le zone di ubicazione dei monumenti quindi, l'eliofania massima si osserva in Luglio (14,9 h/g) mentre la minima è registrata in Dicembre con sole 4,1 h/g. La radiazione solare globale è pari a circa 196 MJ/m^2 anno con estremi in Dicembre (7 MJ/m^2) e Luglio (27 MJ/m^2). La media mensile di radiazione solare globale è quindi pari a $196 \text{ MJ/m}^2/12 = \approx 16 \text{ MJ/m}^2$. Tali dati sono forniti con una media di misurazioni effettuata nel periodo tra il 1994 ed il 2016.

12.2 Settaggio generale della camera climatica FITOCLIMA

Come si è accennato in precedenza, i test sui materiali lapidei vengono riprodotti con l'utilizzo di due camere climatiche, una di tipo FITOCLIMA ed una solare (SOLARBOX).

Nella camera FITOCLIMA è possibile modificare e controllare automaticamente i seguenti parametri:

Temperatura: $+ 10 < T < + 40$ °C

Umidità relativa: $20 < rH < 90\%$

Contenuto di anidride carbonica: $200 < CO_2 < 1000$ ppm

Gli esperimenti in camera FITOCLIMA hanno l'obiettivo di verificare il degrado fisico-meccanico a cui sono soggetti i campioni sottoposti a variazioni cicliche delle condizioni termo-igrometriche.

Gli aging test in camera FITOCLIMA, non sono condotti con il metodo dell'estremizzazione delle condizioni ambientali ma sono state usate le reali condizioni di T, rH e CO₂ di Tab. 12.1.1.

Il test viene accelerato simulando l'effetto delle variazioni giornaliere di temperatura ed umidità relativa in alcuni minuti.

Nel nostro caso si è deciso di simulare le variazioni di T, rH di un giorno reale in 40 min di test. La scelta dei 40 min deriva da alcune prove effettuate in camera climatica in cui si è stabilito che in 40 min il campione uniforma la sua temperatura superficiale, si asciuga e si inumidisce in base ai cicli di umidità e temperatura.

Con una simulazione di 40 min, in un giorno di test (1440 min) vengono riprodotti $1440 \text{ min} / 40 \text{ min} = 36$ cicli, ovvero un numero di cicli di T ed rH che il campione avrebbe subito in situ in 36 giorni.

S'identificano quindi due parametri fondamentali quali:

1) Test time (T_T)

2) Numero di cicli giornalieri riprodotti (N_C)

La funzione che lega i due parametri è semplice:

[1] $N_C = T_T (\text{min}) / 40 \text{ min}$.

12.2.1 Settaggio dei parametri ambientali: temperatura, umidità e contenuto di anidride carbonica

Nel nostro caso, l'obiettivo finale è riprodurre un test accelerato su provino di roccia con a disposizione 6 mesi di test .

In base della [1] con un fattore 40 min, la relazione fra T_T e N_C è mostrata in Tab. 12.2.1.1.

La stima è realizzata considerando la durata di un mese pari a 30 giorni.

T_T (test time)	N_C (numero di cicli riprodotti)
30 giorni (1 mese)	1080
60 giorni (2 mesi)	2160
150 giorni (5 mesi)	5400
180 giorni (6 mesi)	6480

Tabella 12.2.1.1: Relazione tra T_T e N_C considerando un $D = 40$ min.

In un mese di test in camera climatica vengono riprodotti $43200 \text{ min} / 40 \text{ min} = 1080$ cicli di esposizione a T , rH e ovvero un numero di cicli che il campione in monumento avrebbe subito in 3 anni. In 6 mesi vengono riprodotti 6480 cicli ovvero un numero di cicli che il campione in monumento avrebbe subito in 18 anni.

Durante questi sei mesi di test vengono modificati i parametri T ed rH in funzione dei dati presenti in Tab. 12.1.1 che, ricordiamo, sono applicabili a tutti i siti archeologici in studio.

Non solo, i parametri T ed rH non vengono modificati solo sulla base della variazioni giornaliere ma anche su quelle stagionali come da Tab. 12.1.1. Il test è infatti condotto in modo da suddividere 6 mesi di test in 4 parti, ognuna delle quali corrispondenti ad una stagione meteorologica. Si avranno quindi 1,5 mesi di condizioni invernali, 1,5 di condizioni primaverili, 1,5 di condizioni estive ed 1,5 di condizioni autunnali (Fig. 12.2.1).

In Fig. 12.2.1.1 sono realizzati 4 grafici relativi alla variazione dei parametri T ($^{\circ}\text{C}$) ed rH (%) durante le 24 ore di un rappresentativo giorno invernale, primaverile, estivo e autunnale. In Fig. 12.2.1.1 i massimi ed i minimi di T ($^{\circ}\text{C}$) ed rH (%) sono estratti da Tab. 12.1.1. L'andamento giornaliero dei parametri è ricavato da database ARPAS ed AM.

I grafici di Fig. 12.2.1.1 consistono essenzialmente in un asse X primario indicante il test time T_T , ad intervalli di 5 minuti ed un asse X secondario indicante la durata di un girone reale ad intervalli di 3 ore.

Come si può notare, 24 ore giornaliere vengono riprodotte in 40 minuti di T_T per cui un intervallo di gradazione della griglia verticale corrisponde a 5 min di T_T e 3 di giornata reale.

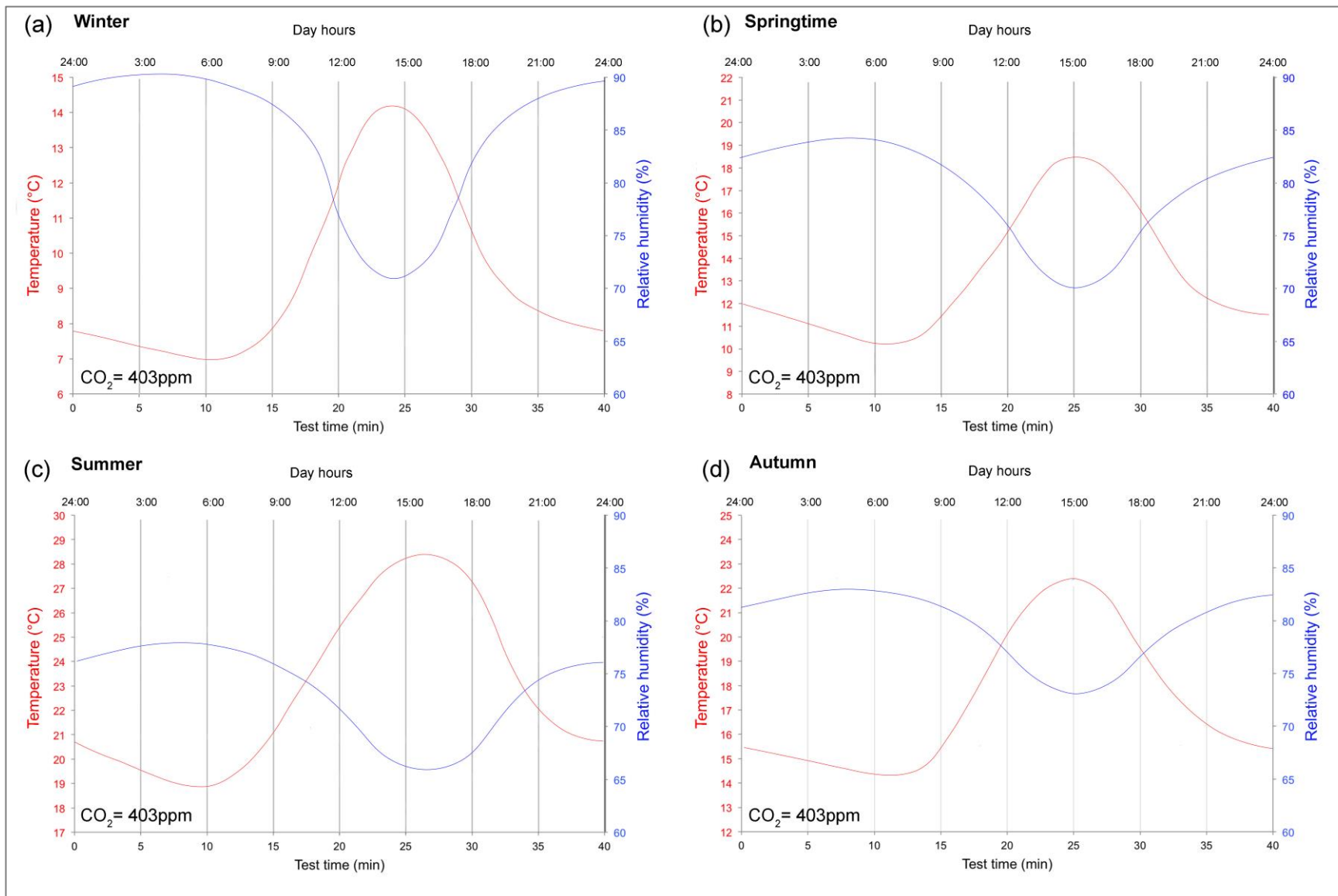


Figura 12.2.1.1: Dati di settaggio della camera climatica, relativi all'andamento delle temperature ed umidità durante un giorno invernale (a), primaverile (b), estivo (c), autunnale (d). Dati di massimi e minimi di T ed rH attenuti da Tab. 12.1.1, andamento orario ottenuto da database AM ed ARPAS.

I grafici inoltre consistono in un asse Y primario indicante la Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ed un asse Y secondario indicante il contenuto di umidità relativa rH (%).

In Fig. 12.2.1.1a si nota il trend di variazione di T ed rH di un comune giorno invernale. Partendo dalle ore 24:00 alle ore 8 circa, durante la notte, la temperatura diminuisce progressivamente con un minimo stagionale di 7°C localizzato alle ore 7:00 circa. In seguito, si ha un progressivo aumento di T con il sorgere del sole che presenta un punto di massimo alle ore 14:00 circa con $14,2^{\circ}\text{C}$ (Tab. 12.1.1). Successivamente una rapida discesa delle temperature è data dal calare del sole durante la sera invernale. Sempre sulla stessa immagine 12.2.1.1a, l'andamento dell'umidità è opposto a quello delle temperature con punto minimo di rH = 71% alle ore 15:00 ed un massimo di rH = 91% alle ore 4:00. Durante il giorno l'umidità relativa media è di circa 81% come da Tab. 12.1.1.

Nelle altre stagioni, i punti di massimo e minimo della temperatura sono anch'essi regolati sulla base del grafico appena descritto e sui dati di Tab. 12.1.1.

Durante i test il contenuto di CO_2 in camera climatica è sempre impostato a 403 ppm, valore di riferimento in Sardegna Novembre 2016-Gennaio 2017 (ultimo rilevamento su portale meteorologico GIOVANNI, National Aeronautics and Space Administration).

A conclusione del paragrafo è importante sottolineare che nei test in camera FITOCLIMA condotti nel modo appena illustrato, non esiste un modello matematico per cui è possibile stabilire, in termini di degrado, a quanto tempo reale (Aging time T_A) corrisponderebbe una esposizione agli agenti atmosferici in sei mesi di test. Infatti, è solo possibile dichiarare, ad esempio, che in sei mesi di test i campioni sono esposti ad un numero di cicli di T ed rH che avrebbero subito in 18 anni sul monumento.

12.3 Settaggio della camera climatica solare (SOLARBOX)

Nella camera climatica solare SOLARBOX è possibile modificare solo il parametro irradianza in un intervallo $250 < I < 1100 \text{ W/m}^2$ con campo spettrale $290 < \lambda < 800 \text{ nm}$. I test hanno il fine di verificare la variazione di colore del provino lapideo sottoposto ad una certa irradianza per sei mesi di test. Anche in questo caso, i test sono eseguiti su sette fra le più rappresentative litologie di costruzione dei monumenti in studio.

A differenza dei test eseguiti in camera FITOCLIMA, gli aging test con camera solare SOLARBOX vengono accelerati mediante estremizzazione del parametro irradianza. E' possibile, in questo caso, costruire una relazione tra tempo di permanenza del provino in camera climatica (Test time T_T) ed Aging time (T_A). Con Aging time s'intende, appunto, il tempo di esposizione ipotetica del provino corrispondente ad un certo periodo di test T_T .

La relazione tra T_T e T_A , sulla base di un certo valore irradianza, è regolata dalle [2, 3] esposte in seguito.

L'aging test viene condotto proporzionando l'irradianza normale del luogo di ubicazione del sito archeologico e l'irradianza normale del luogo di calibrazione della SOLARBOX considerato come standard. Quest'ultimo è Miami (USA), dove viene registrata una irradiazione media di circa $1 \text{ MJ/m}^2/\text{giorno}$ (periodo 1994-2016). Come da Capitolo 4, nello stesso periodo 1994-2016, nei luoghi di ubicazione dei siti si registra una radiazione solare media pari a $16 \text{ MJ/m}^2/\text{mese}$ corrispondenti a $0,53 \text{ MJ/m}^2/\text{giorno}$. Ne consegue che la radiazione giornaliera media nel luogo standard è pari a $1/0,53 = 1,89$ (fattore di confronto F) volte la radiazione giornaliera media del luogo di localizzazione dei siti archeologici. Con un'irradiazione di 550 W/m^2 per un ora di test, si riproducono $5,3 \text{ MJ/m}^2$ ovvero 5,3 giorni di esposizione a Miami e $5,3 \cdot F$ nel luogo di ubicazione dei nostri monumenti. Possiamo dichiarare come a 500 W/m^2 , per un tempo di test in camera climatica $T_T = 1$ ora, si riproduce un aging time T_A di circa 10 ore per cui la relazione che lega i due parametri è la seguente: [2] $T_T = 5,3 \cdot F \cdot T_A \approx 10 T_A$ (550 W/m^2)

La relazione tra T_T e T_A è illustrata in Tab. 12.3.1 considerando, come per la FITOCLIMA, un test time T_T a nostra disposizione di 6 mesi.

T_T (test time)	T_A (aging time)
1 ore	10 ore
720 ore (1 mese)	7200 ore (10 mesi)
3600 ore (5 mesi)	36000 ore (50 mesi)
4320 ore (6 mesi)	43200 ore (60 mesi)

Tabella 12.3.1: Relazione tra T_T e T_A per $I = 550 \text{ W/m}^2$.

Al fine di poter riprodurre un valore più elevato di T_A , per il nostro esperimento è stata impostata un'irradiazione pari a 700 W/m^2 . Con un'irradiazione di 700 W/m^2 in un'ora di test si riproducono $6,75 \text{ MJ/m}^2$ ovvero $6,75$ giorni di esposizione a Miami e $6,75 \cdot F = 12,75$ giorni in Sardegna secondo la [3]

$$[3] T_T = 6,75 \cdot F \cdot T_A = \approx 12,8 T_A \text{ (700 W/m}^2\text{)}$$

Un breve relazione tra T_T e T_A è illustrata in Tab. 12.3.2.

T_T (test time)	T_A (aging time)
1 ore	12,8 ore
720 ore (1 mese)	9216 ore (12,8 mesi)
3600 ore (5 mesi)	46080 ore (64 mesi)
4320 ore (6 mesi)	55296 ore (76,8 mesi)

Tabella 12.3.2: Relazione tra T_T e T_A per $I = 700 \text{ W/m}^2$.

I test accelerati d'invecchiamento (aging tests)

13.1 Modalità della prova e preparazione dei provini per la camera FITOCLIMA

I test accelerati con camera climatica FITOCLIMA sono stati condotti su provini realizzati con il materiale prelevato dalle cave. Le stesse cave, ricordiamo, sono state individuate per ogni litologia tramite dati bibliografici e confronto incrociato materiali monumentali - materiali di affioramento. Tale confronto è stato effettuato con caratterizzazioni minero-petrografiche e, nel caso dei marmi, con analisi isotopiche.

Il test d'invecchiamento è stato eseguito su 7 litologie più rappresentative e frequenti nei monumenti studiati quali: dacite/riodacite, pietra Cantone, pietra Forte, marmo, basalto, arenaria ed ignimbrite.

Per i test sono stati realizzati:

- 14 provini “madre” di forma cubica ($50 \times 50 \times 50 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$) suddivisi in: 2 di pietra Cantone, 2 di pietra Forte, 2 di basalto, 2 di dacite/riodacite, 2 di arenaria e 4 di ignimbrite (2 provini per la *facies* verde e 2 due per la *facies* rossa).
- 2 provini “madre” di forma prismatica ($50 \times 50 \times 30 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$) di marmo.

Per ognuno dei provini “madre”, sono stati realizzati 5 piccoli campioni “pilota” di dimensioni circa $15 \times 15 \times 15 \text{ mm}$ per un totale di $16 \times 5 = 80$ provini. I campioni pilota sono sottoposti in camera climatica agli stessi parametri climatici del campione “madre”. La necessità di realizzare campioni madre e pilota nasce dal fatto che alcune proprietà fisiche possono essere misurate solo in provini con una certa dimensione. Ad esempio, la densità è misurata sui provini pilota poiché i provini madre presentano un volume troppo grande per essere misurato al picnometro. La misura delle velocità ultrasoniche richiede, al contrario, provini di dimensioni maggiori per i trasduttori.

Come visibile in Fig. 13.1.1 e 13.1.2, i campioni “madre” sono stati orientati secondo gli assi x, y, z arbitrari e sulla base di questa orientazione sono stati rinominati i vertici del cubetto con lettere A, B, C, D, E, F, G, H al fine di individuare facilmente un lato (e.g., AB) oppure una superficie (e.g., EFGH).

Tali sistemi di riferimento di vertici ed assi consentono una facile orientazione del provino in vista, ad esempio, delle prove ultrasoniche.

In Tab. 13.1.1 sono illustrati alcuni dati identificativi per ognuno dei 16 provini madre da sottoporre ad aging test e le modalità di svolgimento della prova. Nella prima colonna è specificato il nome attribuito al campione, nella seconda s'identifica la sua litologia, nella terza invece è specificato il monumento in cui tale litologia è stata utilizzata mentre nella quarta è riportata la cava di provenienza.

Ulteriori informazioni riportate nella colonna quinta riguardano il tipo di agente atmosferico cui il campione è soggetto secondo dati climatici di Capitolo 12.

Per alcuni provini oltre alle già citate temperatura (T), umidità relativa (rH) e contenuto di CO₂ è stato deciso di simulare l'effetto della risalita capillare d'acqua (RC), fenomeno già osservato *in situ* nelle parti basse del monumento e classificato tra i principali fattori di degrado delle strutture.

Nome campione	Litologia	Monumento di utilizzo della litologia	Cava di provenienza	Agente atmosferico riprodotto
AN1 50x50x50 mm ± 5 mm	Dacite/Riodacite	Teatro di Nora	Su Casteddu (Pula)	T, rH, CO ₂ , RC _S
AN2 50x50x50 mm ± 5 mm				T, rH, CO ₂ , RC _M
PC1 50x50x50 mm ± 5 mm	Pietra Cantone	Basilica di San Saturnino	Colle Bonaria (Cagliari)	T, rH, CO ₂ , RC _M
PC2 50x50x50 mm ± 5 mm				T, rH, CO ₂ , RC _F
PF1 50x50x50 mm ± 5 mm	Pietra Forte			T, rH, CO ₂ , RC _F
PF2 50x50x50 mm ± 5 mm				T, rH, CO ₂ , RC _M
MA1 50x50x30 mm ± 3 mm	Marmo		N.D. (recupero da segheria)	T, rH, CO ₂ , RC _F
MA2 50x50x30 mm ± 3 mm			T, rH, CO ₂ , RC _M	
BA1 50x50x50 mm ± 5 mm	Basalto	Lastricato del <i>Cardo</i> (Tharros)	Cava interna al sito archeologico	T, rH, CO ₂ , RC _S
BA2 50x50x50 mm ± 5 mm				T, rH, CO ₂ , RC _M
AT1 50x50x50 mm ± 5 mm	Arenaria	Terme II (Tharros)	"Sala da Ballo" (San Giovanni Sinis)	T, rH, CO ₂ , RC _M
AT2 50x50x50 mm ± 5 mm				T, rH, CO ₂ , RC _S
IGv1 50x50x50 mm ± 5 mm	Ignimbrite <i>facies</i> verde	Forum Traiani	Cava interna al sito archeologico	T, rH, CO ₂ , RC _T
IGv2 50x50x50 mm ± 5 mm				T, rH, CO ₂ , RC _M
IGr1 50x50x50 mm ± 5 mm	Ignimbrite <i>facies</i> rossa			T, rH, CO ₂ , RC _T
IGr2 50x50x50 mm ± 5 mm				T, rH, CO ₂ , RC _M

Tabella 13.1.1: Elenco dei provini cubici (50x50x50 mm ± 5 mm) e prismatici (50x50x30 mm ± 3 mm) da sottoporre ad aging test in camera FITOCLIMA. T = temperatura, rH = umidità relativa, CO₂ = contenuto di CO₂, RC_M = test di risalita capillare con acqua meteorica, RC_S = test di risalita capillare con acqua di mare, RC_F = test di risalita capillare con acqua di falda di S. Saturnino, RC_T = test di risalita capillare con acqua termale del Forum Traiani. Ad ognuno di questi provini madre corrispondono 5 provini pilota.

Normalmente, i test di cristallizzazione salina, sono condotti secondo raccomandazioni EN12370 con l'uso di una soluzione di Na₂SO₄ 14% Vol. Al fine di riprodurre una condizione ambientale più veritiera, i nostri test sono stati eseguiti con acqua campionata direttamente *in situ*.

Per ciascuna litologia, sono stati condotti test di cristallizzazione con acqua salina e acqua meteorica. Specularmente tutto ciò è avvenuto anche nei campioni pilota. Ad esempio, nei campioni

di dacite/riodacite, il provino madre AN1 ed i corrispondenti 5 campioni pilota sono stati sottoposti a T, rH, CO₂, RC_S mentre il campione madre AN2 ed i corrispondenti 5 campioni pilota sono stati sottoposti a T, rH, CO₂, RC_M.

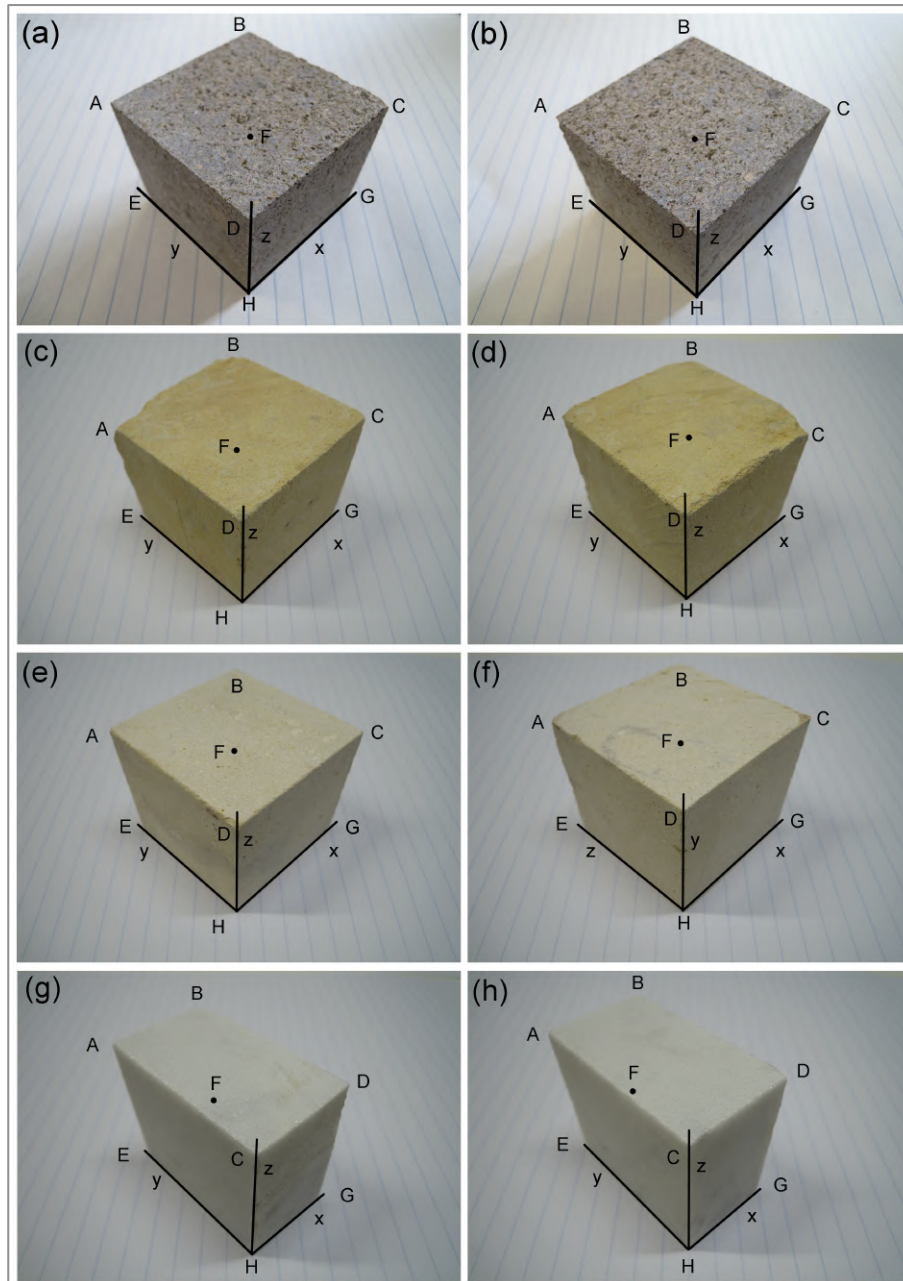


Figura 13.1.1: Provini cubici madre (50x50x50 mm ± 5 mm) e prismatici (50x50x30 mm ± 3 mm) per aging test in camera FITOCLIMA. (a) dacite/riodacite AN1, (b) dacite/riodacite AN2, (c) pietra Cantone PC1, (d) pietra Cantone PC2, (e) pietra Forte PF1, (f) pietra Forte PF2, (g) marmo MA1, (h) marmo MA2. Ad ognuno di questi provini madre corrispondono 5 provini pilota.

In Tab. 13.1.1, i test di risalita capillare con acqua meteorica sono indicati con la dicitura RC_M mentre quelli con acque saline con le diciture RC_S, RC_F, ed RC_T, in base al tipo di acqua utilizzata. Ad esempio, nel campione di dacite/riodacite AN1 il test di risalita capillare avviene con l'utilizzo di acqua marina (RC_S, Tab. 13.1.1), col fine di simulare il movimento dell'acqua nei gradini del

Teatro in cui, le irregolarità topografiche delle superfici, permettono il ristagno di acqua meteorica, successivamente, salinizzata a causa dell'alto contenuto di aerosol marino della zona.

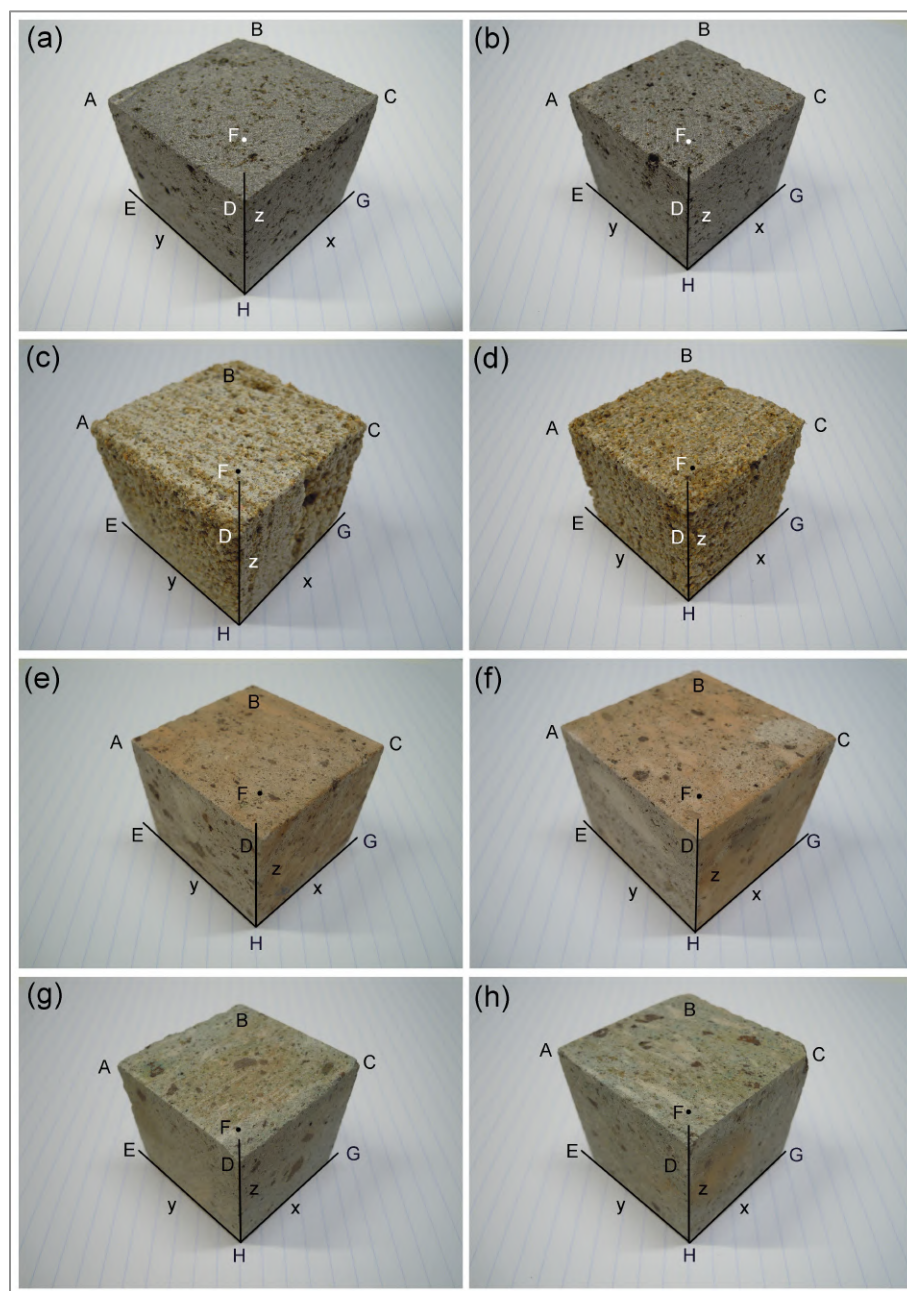


Figura 13.1.2: Provini cubici (50x50x50 mm \pm 5 mm) per aging test in camera FITOCLIMA (a) basalto BA1, (b) basalto BA2, (c) arenaria AT1, (d) arenaria AT2, (e) ignimbrite *facies* rossa IGr1, (f) ignimbrite *facies* rossa IGr2, (g) ignimbrite *facies* verde IGv1, (h) ignimbrite *facies* verde IGv2. Ad ognuno di questi provini madre corrispondono 5 provini pilota.

Per la pietra Forte (campione PF1), la pietra Cantone (campione PC2) ed il marmo (campione MA1), è stata simulata una risalita capillare con acqua di falda prelevata nella zona della Basilica di San Saturnino (RC_F , Tab. 13.1.1).

Questa prova ha il fine di simulare la risalita capillare di acqua di falda che avviene nella cripta del monumento coinvolgendo i materiali delle murature interne. Già nei capitoli precedenti si accennava come la zona della cripta è tuttora allagata e soggetta a fluttuazioni del livello di falda con una soggiacenza variabile dai 3 ai 4 metri.

Per quanto riguarda l'arenaria (campione AT2), ed il basalto (campione BA1), è stata simulata una risalita capillare con acqua salata (RC_S, Tab. 13.1.1). La prova ha lo scopo di simulare la risalita capillare di acqua marina nel lastricato o nelle sponde. Il processo è del tutto simile a quello descritto nel Teatro di Nora; acque piovane ristagnano sulle irregolarità topografiche delle superfici rimanendo in contatto con l'aerosol marino salinizzandosi. Il processo di salinizzazione dell'acqua è a Tharros estremamente rapido a causa della frequente presenza di vento di maestrale, con punte di velocità sino a 80 km/h in grado di trasportare un elevato flusso di spray marino. Non solo, venti di scirocco di notevole velocità sarebbero in grado di depositare acqua salata sul monumento direttamente per via balistica.

Nei campioni d'ignimbrite IGv1 ed IGr1 è simulata una risalita capillare delle acque di risorgiva termale prelevate nello stesso Forum Traiani (RC_T, Tab. 13.1.1).

I test di cristallizzazione salina con acqua meteorica (RC_M, Tab. 13.1.1), hanno il fine di simulare l'effetto della pioggia.

Prima, durante ed in seguito all'aging test, alcuni parametri sono stati monitorati ad intervalli di tempo regolari al fine di verificare la variazione di alcune caratteristiche fisico-meccaniche e chimiche nel tempo (Tab. 13.1.2).

In Tab. 13.1.2 si osserva come gli step di monitoraggio non siano sempre gli stessi per i vari parametri. La scelta dello step di monitoraggio varia, infatti, in base al tipo di prova.

Normalmente, step brevi (15 giorni) vengono utilizzati nella misurazione di caratteristiche fisiche che variano molto velocemente quali ad esempio la massa del provino.

Step di monitoraggio pre e post prova vengono utilizzati nella misurazione di caratteristiche fisico-meccaniche o chimiche che variano molto lentamente quali ad esempio densimetrie, porosità, e resistenze meccaniche, morfologia del provino oppure la scabrosità superficiale.

Le resistenze meccaniche a punzonamento, trazione e compressione in fase pre test, essendo proprietà misurabili solo attraverso prove distruttive, sono state misurate su ulteriori 5 campioni appartenenti al medesimo blocco litologicamente omogeneo da cui sono stati ricavati anche gli altri campioni madre e pilota.

Caratteristiche fisiche	Strumento di misura	Step di monitoraggio	Provino su cui è eseguita la misurazione
Rugosità superficiale (J.R.C.)	Profilometro	Pre prova - Post prova	Madre
Massa campione (W)	Bilancia di precisione	Pre prova - ogni 15 gg - Post prova	Madre
Velocità onda compressionale (Vp)	Pundit	Pre prova - Post prova	Madre
Densità reale (ρ_R)	Picnometro	Pre prova - Post prova	Pilota
Densità apparente (ρ_B)	Picnometro	Pre prova - Post prova	Pilota
Coefficiente d'imbibizione (CI_w)	Picnometro, bilancia	Pre prova - Post prova	Pilota
Indice di saturazione (S.I.)	Picnometro, bilancia	Pre prova - Post prova	Pilota
Porosità aperta all'elio (Φ_{He})	Picnometro, bilancia	Pre prova - Post prova	Pilota
Porosità aperta all'acqua (Φ_{H_2O})	Picnometro, bilancia	Pre prova - Post prova	Pilota
Caratteristiche meccaniche	Strumento di misura	Step di monitoraggio	
Resistenza a punzonamento (I_{S50})	Point Load Tester	Pre prova - Post prova	Pilota
Resistenza a trazione (R_T)	Relazione indiretta	Pre prova - Post prova	Pilota
Resistenza a compressione (R_C)	Relazione indiretta	Pre prova - Post prova	Pilota
Caratteristiche chimiche	Strumento di misura	Step di monitoraggio	
Analisi delle efflorescenze	μ -XRD	Post prova	Madre
Variazioni morfologiche di superficie	Strumento di misura	Step di monitoraggio	
Ricostruzione fotogrammetrica	Fotocamera	Pre prova - Post prova	Madre

Tabella 13.1.2: Caratteristiche fisiche, meccaniche, chimiche e morfologiche monitorate durante l'aging test in camera FITOCLIMA.

13.2 Modalità della prova e preparazione dei provini per la camera SOLARBOX

Per quanto riguarda i campioni dedicati alla camera SOLARBOX sono stati usati dei provini di forma irregolare. Il test ha la funzione di monitorare la variazione del colore del provino durante un $T_T = 6$ mesi corrispondenti a $T_A = 76,8$ mesi a 700 W/m^2 .

I test sono stati effettuati su 7 campioni di roccia corrispondenti alle 7 litologie selezionate (dacite/riodacite, pietra Cantone, pietra Forte, marmo, basalto, arenaria ed ignimbrite).

Durante il test in SOLARBOX i colori dei provini vengono monitorati ad intervalli di tempo regolari (15 gg).

Un breve resoconto del tipo e frequenza di monitoraggio delle caratteristiche colorimetriche è illustrato in Tab. 13.2.1.

Caratteristiche colorimetriche	Strumento di misura	Step di monitoraggio
Luminosità (L)	Colorimetro	Pre prova - ogni 15 gg - Post
Colore opponente a (a)	Colorimetro	Pre prova - ogni 15 gg - Post
Colore opponente b (b)	Colorimetro	Pre prova - ogni 15 gg - Post

Tabella 13.2.1: Caratteristiche cromatiche delle sette litologie monitorate durante l'aging test in camera SOLARBOX.

Le alterazioni e le degradazioni dei materiali lapidei tramite *aging tests*: risultati e discussioni

Come riportato nella Tab. 13.1.2 (Capitolo 13), durante i sei mesi di sperimentazione tramite *aging test* in camera FITOCLIMA e SOLARBOX, una serie di parametri petro-fisici e meccanici dei provini sono stati monitorati progressivamente per step al fine di determinare le loro variazioni nel tempo. Si riportano di seguito i dati rilevati suddivisi in: caratteristiche fisiche, meccaniche e chimico-mineralogiche, colorimetriche ed "altre caratteristiche" (morfologiche).

14.1 Variazioni morfologiche di superficie

La ricostruzione fotogrammetrica dei provini 50x50x50 mm ± 5 mm in fase pre-test e post-test è disponibile *online* mediante i link riportati nella Tab. 14.1.1.

Campione	Link a modello online
AN1 pre test	https://sketchfab.com/3d-models/an1-pre-test-a718263f1ca441e9ba401b59dbdb50b7
AN1 post test	https://sketchfab.com/3d-models/an1-post-test-948eb9133a9143d39de43ed528dd5e19
AN2 pre test	https://sketchfab.com/3d-models/an2-pre-test-aca0c47b18514f1aa799683636fb04ca
AN2 post test	https://sketchfab.com/3d-models/an2-post-test-45798a7ad744413db6ac57bcf4f2a16b
PC2 pre test	https://sketchfab.com/3d-models/pc2-pre-test-d159440935b540c795653d68b1599f48
PC2 post test	https://sketchfab.com/3d-models/pc2-post-test-7395a7dd971d416f8fb794266cfd38b3
PC1 pre test	https://sketchfab.com/3d-models/pc3-pre-test-64b24e2bc65d479ea594c332b3f3d0dd
PC1 post test	https://sketchfab.com/3d-models/pc3-post-test-683917514a90489c9ab7f4e3ae4bfd05
PF1 pre test	https://sketchfab.com/3d-models/pf1-pre-test-2160bd5b5dfd44f18c11d948d21461f6
PF1 post test	https://sketchfab.com/3d-models/pf1-post-test-9e6bb26d248240d3ba8fa10a24cb59e3
PF2 pre test	https://sketchfab.com/3d-models/pf2-pre-test-f935ddcc581e490293535e116d687146
PF2 post test	https://sketchfab.com/3d-models/pf2-post-test-a375ef7a294548e6a6d62deeb8634c8c
BA1 pre test	https://sketchfab.com/3d-models/ba1-pre-test-8d3db451fef9408ba79ca65f5b094ebc
BA1 post test	https://sketchfab.com/3d-models/ba1-post-test-4d6e57cc9fb5422785c5149afd67803d

Tabella 14.1.1: Link dei modelli *online* dei campioni cubici 50x50x50 mm ± 5 mm sottoposti agli *aging test*. Nei campioni marmorei MA1 ed MA2 di dimensioni 50x50x30 mm ± 3 mm non è stato possibile ricostruire un modello 3D (continua sotto).

Campione	Link a modello online
BA2 pre test	https://sketchfab.com/3d-models/ba2-pre-test-1fa63668663142418c6a0ad3aa316001
BA2 post test	https://sketchfab.com/3d-models/ba2-post-test-30d190b19118421a8d6ae31978c55453
AT1 pre test	https://sketchfab.com/3d-models/at1-pre-test-ea31d8c829f346798abec56bd9b5898f
AT1 post test	https://sketchfab.com/3d-models/at1-post-test-bb4aa8063c3141ce802c50a2ba07fdb5
AT2 pre test	https://sketchfab.com/3d-models/at2-pre-test-0f2be0e60ed946ae9b7eac8c08110731
AT2 post test	https://sketchfab.com/3d-models/at2-post-test-f0d151247d4141f1b3f86a8c14e9d5a5
IGr1 pre test	https://sketchfab.com/3d-models/igr1-pre-test-8ed55a9600fb4c6d967ed386ef240b3f
IGr1 post test	https://sketchfab.com/3d-models/igr1-post-test-f85c591d735745f8a63b8aa0164f749a
IGr2 pre test	https://sketchfab.com/3d-models/igr2-pre-test-ed92ca74469147ee8b0bbca49ca4cf7b
IGr2 post test	https://sketchfab.com/3d-models/igr2-post-test-27fee2bd039a409b8d90b85a56cb6632
IGv1 pre test	https://sketchfab.com/3d-models/igv1-pre-test-f7d9712f3ecb4559bfcc67ebe454679d
IGv1 post tests	https://sketchfab.com/3d-models/igv1-post-test-4822b330237b41cbaadf4b4ec6e6e46a
IGv2 pre test	https://sketchfab.com/3d-models/igv2-pre-test-ffb1cd38ba314ef595311a8f474d45a5
IGv2 post test	https://sketchfab.com/3d-models/igv2-post-test-726576b982c54d8ba3fd9a3ef972ab3f

Tabella 14.1.1: Link dei modelli *online* dei campioni cubici 50x50x50 mm \pm 5 mm sottoposti agli *aging test*. Nei campioni marmorei MA1 ed MA2 di dimensioni 50x50x30 mm \pm 3 mm non è stato possibile ricostruire un modello 3D.

La ricostruzione tridimensionale dei provini dà la possibilità ad un osservatore di quantificare visivamente le variazioni morfologiche che ha subito il provino durante i test di degrado accelerato in camera FITOCLIMA. I modelli ad alta risoluzione dei campioni sono caricati online in una apposita interfaccia web Sketchfab. Nei marmi, l'impossibilità di creare un modello 3D è dovuta al fatto che si tratta di una roccia olocristallina, i cui cristalli presentano una restituzione della luce variabile da posizione a posizione non consentendo al software di elaborazione di creare una nube densa di punti.

In Fig. 14.1.1 sono illustrati alcuni modelli rappresentativi di campioni in cui è possibile identificare le variazioni morfologiche e dell'aspetto fisico dei provini dovute a processi di decoesione granulare, esfoliazione e/o comparsa di efflorescenze.

In Fig. 14.1.1a, b il campione di pietra Forte PF1 è mostrato in fase pre e post-aging test. Si nota come in seguito all'*aging test* sulla superficie del campione siano comparse delle efflorescenze di fasi cristalline di colore biancastro con aspetto pulverulento. Si nota, inoltre, un'ampia "mancanza" di materiale indicato della freccia rossa dovuta ad una esfoliazione avvenuta a $T_T = 135$ giorni su una fratturazione preesistente, peraltro visibile in fase pre-test (Fig. 14.1.1a).

In Fig. 14.1.1d nel campione di pietra cantone PC1, la freccia rossa indica una zona in cui è avvenuta la decoesione con la perdita di un piccolo frammento. Si nota come in fase pre-test la superficie del campione fosse planare e più liscia (Fig. 14.1.1c), mentre in fase post si ha un principio di erosione differenziale per cui i componenti allochimici, caratterizzati da una maggiore

durezza, enucleano rispetto alla meno resistente matrice carbonatica. Variazioni morfologiche più evidenti sono registrate di solito nei provini sottoposti ai test di cristallizzazione con acque ad alto contenuto salino (e.g., RC_S, RC_F, RC_T, Tab. 13.1.2).

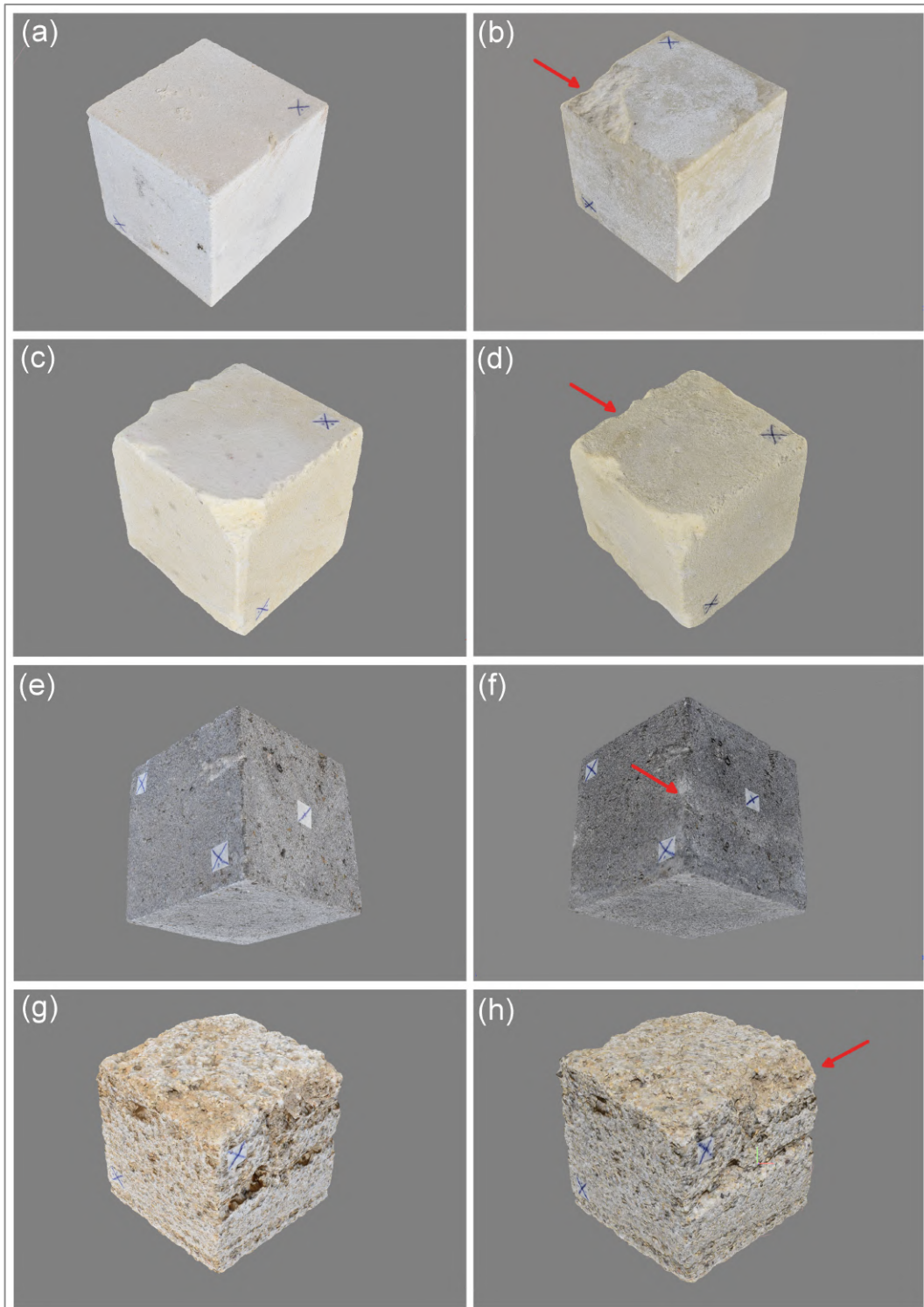


Figura 14.1.1: Ricostruzioni fotogrammetriche pre-test (sinistra) e post-test (destra) dei campioni 50x50x50 mm \pm 5 mm soggetti a variazioni di T, rH, CO₂ ed RC in camera FITOCLIMA. Con le linee rosse sono evidenziate le variazioni morfologiche o la comparsa di efflorescenze. (a, b) campione di pietra Forte PF1, (c, d) campione di pietra Cantone PC1, (e, f) campione di basalto BA2, (g, h) campione di arenaria AT1.

In Fig. 14.1.1f il campione di basalto BA2 proveniente da una affioramento nei pressi di Tharros, presenta delle efflorescenze, indicate con la freccia rossa. Inoltre, si nota molto bene in tutte le facce del campione la linea suborizzontale di massima risalita capillare.

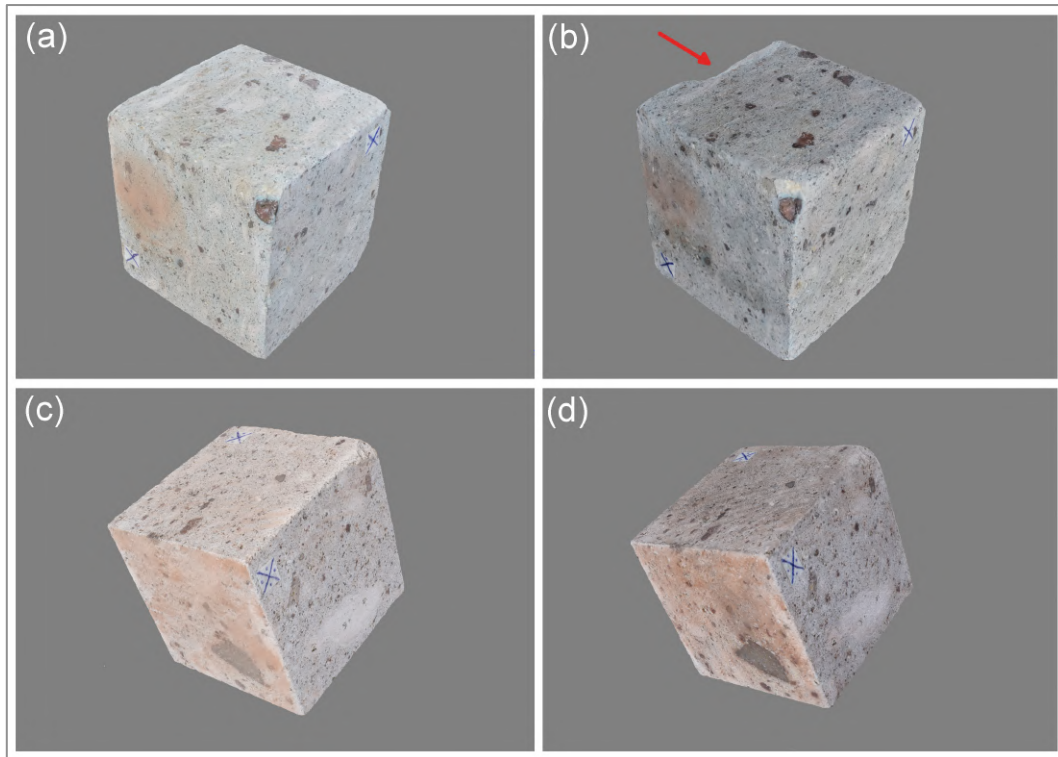


Figura 14.1.2: Ricostruzioni fotogrammetriche pre-test (sinistra) e post-test (destra) dei campioni $50 \times 50 \times 50 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ soggetti a variazioni di T, rH, CO_2 ed RC in camera FITOCLIMA. Con le linee rosse sono evidenziate le variazioni morfologiche o la comparsa di efflorescenze. (a, b) campione di ignimbrite in *facies* verdastra IGv2, (c, d) campione di ignimbrite in *facies* rossastra IGr2.

Nell'arenaria Tirreniana di Fig. 14.1.1g, h si nota come l'*aging test* abbia determinato una modificazione della morfologia della superficie e dello spigolo (vedi zona indicata dalla freccia rossa).

La morfologia iniziale del provino IGv2 (Fig. 14.1.2a) è stata modificata per la perdita di un grosso frammento a $120 < T_T < 150$ giorni (Tab. 14.2.4), indicato con una freccia rossa in Fig. 14.1.2b.

In IGr2 (Fig. 14.1.2c, d) l'*aging test* non ha comportato una particolare variazione della morfologia esterna tale da essere visibile macroscopicamente.

14.2 Confronto dei dati pre e post *aging test*

14.2.1 Proprietà fisiche

Rugosità J.R.C (Joint Roughness Coefficient)

Il Joint Roughness Coefficient (secondo gli autori Barton & Choubey 1977) è un parametro utilizzato per la misura della scabrosità della superficie di un provino di roccia. È determinato confrontando il profilo della rugosità della superficie lapidea con una tabella sinottica (Fig. 14.2.1.1). Poiché la lunghezza dei profili standard è pari a 10 cm, l'indice J.R.C. fornisce indicazione sulle asperità a scala millimetrica con 10 profili tipici di rugosità (classi) ognuno dei quali costituisce 2 gradi di J.R.C secondo Fig. 14.2.1.1. Nel nostro caso la misurazione di tale parametro è avvenuta, come da Tab. 13.1.2 (Capitolo 13) con due step di misurazione, ovvero uno iniziale pre-test a $T_T = 0$, ed uno finale post-test ovvero $T_T = 6$ mesi. La misura di J.R.C è stata eseguita sulla mezzeria di ognuna delle sei superfici dei provini $50 \times 50 \times 50 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ e $50 \times 50 \times 30 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ (Tab. 14.2.1.1). E' stato quindi calcolato un J.R.C medio uguale alla media aritmetica delle 6 misure di ogni lato.

Campione	Litologia	$T_T = 0$ (pre <i>aging test</i>)						
		J.R.C. Lato 1	J.R.C. Lato 2	J.R.C. Lato 3	J.R.C. Lato 4	J.R.C. Lato 5	J.R.C. Lato 6	J.R.C. Medio
AN1	Dacite/riodacite	1	1	1	1	1	1	1
AN2		1	1	1	1	1	1	1
PF1	Pietra Forte	1	1	1	1	1	1	1
PF2		1	1	1	1	1	1	1
PC1	Pietra	2	1	5	5	6	2	3,50
PC2	Cantone	1	2	1	1	6	6	2,83
MA1	Marmo	1	1	1	1	1	1	1
MA2		1	1	1	1	1	1	1
BA1	Basalto	1	1	1	1	2	1	1,17
BA2		1	1	1	1	2	1	1,17
AT1	Arenaria	6	10	10	4	4	6	6,67
AT2		2	8	6	6	4	2	4,67
IGv1	Ignimbrite <i>facies</i> verdastra	1	1	1	1	1	1	1
IGv2		1	1	1	1	1	1	1
IGr1	Ignimbrite <i>facies</i> rossastra	1	1	1	1	1	1	1
IGr2		1	1	1	1	1	2	1,17

Tabella 14.2.1.1. Scabrosità superficiale pre-test delle 6 facce relative ad ognuno dei 17 provini madre.

Come mostra la Tab. 14.2.1.1 a $T_T = 0$ (pre *aging test*) i campioni mostrano una scabrosità variabile tra 1 e 6,67. Valori bassi di scabrosità sono rilevati nelle daciti/riodaciti (1), nei marmi (1), nella pietra Forte (1), nei basalti (1,17) e nelle ignimbriti ($1 < \text{J.R.C.} < 1,17$).

Valori più elevati sono tipici della pietra Cantone (3,16) e dell'arenaria (5,67) dove la difficoltà di taglio nella prima e la macro-porosità interna nella seconda, hanno reso difficile la realizzazione di provini perfettamente cubici. I valori di J.R.C a $T_T = 6$ mesi sono plottati in Tab. 14.2.1.1.

Campione	Litologia	$T_T = 6$ mesi, 180 giorni (post <i>aging test</i>)						
		J.R.C. Lato 1	J.R.C. Lato 2	J.R.C. Lato 3	J.R.C. Lato 4	J.R.C. Lato 5	J.R.C. Lato 6	J.R.C. Medio
AN1	Dacite/riodacite	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
AN2		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
PF1	Pietra Forte	1,00	6,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,83
PF2		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
PC1	Pietra Cantone	2,00	1,00	6,00	6,00	6,00	3,00	4,00
PC2		1,00	2,00	2,00	1,00	7,00	7,00	3,33
MA1	Marmo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
MA2		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
BA1	Basalto	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,00	1,17
BA2		1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,00	1,17
AT1	Arenaria	6,00	10,00	11,00	4,00	4,00	6,00	6,83
AT2		2,00	8,00	7,00	6,00	4,00	2,00	4,83
IGv1	Ignimbrite <i>facies</i> verdastra	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
IGv2		2,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,17
IGr1	Ignimbrite <i>facies</i> rossastra	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
IGr2		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,17

Tabella 14.2.1.2 Scabrosità superficiale post-test delle 6 facce relative ad ognuno dei 17 provini.

Campione	Litologia	J.R.C. Pre-test	J.R.C. Post-test	$\Delta_{J.R.C.}$ (%)
AT1	Dacite/riodacite	1,00	1,00	0,00
AT2		1,00	1,00	0,00
PF1	Pietra Forte	1,00	1,83	83,00
PF2		1,00	1,00	0,00
PC1	Pietra Cantone	3,50	4,00	14,29
PC2		2,83	3,33	17,67
MA1	Marmo	1,00	1,00	0,00
MA2		1,00	1,00	0,00
AN1	Basalto	1,17	1,17	0,00
AN2		1,17	1,17	0,00
PF1	Arenaria	6,67	6,83	2,40
PF2		4,67	4,83	3,43
IGv1	Ignimbrite <i>facies</i> verdastra	1,00	1,00	0,00
IGv2		1,00	1,16	16,00
IGr1	Ignimbrite <i>facies</i> rossastra	1,00	1,00	0,00
IGr2		1,17	1,17	0,00

Tabella 14.2.1.3 Scabrosità superficiale pre-test, post-test e $\Delta_{J.R.C.}$ (%) dopo 6 mesi di *aging test* in camera FITOCLIMA per i campioni analizzati.

Il confronto tra scabrosità pre-test e post-test (Tab. 14.2.1.3), indica che in alcuni campioni l'invecchiamento indotto non abbia comportato variazioni morfologiche della superficie esterna tali

da essere identificati sinotticamente. Questo è avvenuto nei: marmi, basalti, pietra Forte, daciti/riodaciti ed ignimbriti di *facies* rossastra. In questi campioni, le perdite in peso dovute all'alterazione risultano costanti e modeste Fig. 14.2.1.2h, tali da non modificare sensibilmente la forma esterna del provino. Nei restanti campioni, quali ad esempio l'arenaria, una variazione $\Delta_{J,R,C} = 2,4$ e $3,43\%$ è registrata nei campioni AT1 ed AT2. In questi, l'*aging test* ha comportato la perdita in peso in seguito al processo di disgregazione granulare che ha conseguentemente mutato la scabrosità della superficie esterna. È interessante notare come $\Delta_{J,R,C}$ risulti maggiore nel campione sottoposto a risalita capillare con acqua di mare AT2 che ha sensibilmente enfatizzato il processo di disgregazione granulare come per altro rilevabile dalle perdite in peso, vedi Fig. 14.2.1.2f.

Nella pietra Cantone, un $\Delta_{J,R,C} = 14,29\%$ e $17,67\%$ interessa i campioni PC1, PC2. In questo litotipo, una decoesione ("sfarinamento") costante ed elevato, associato a perdite in peso per esfoliazione con distacco di frammenti anche nell'ordine di 0,5 g (Fig. 14.2.1.2c), causa una rapida alterazione del profilo superficiale del provino con un chiaro aumento della scabrosità.

In IGv2, un aumento del 16% della scabrosità è avvenuto durante il test di degrado a $120 < T_T < 150$ (Fig. 14.2.1.2g), a causa di un principio di esfoliazione che ha comportato la perdita in peso di 2 frammenti di massa totale circa 2 g.

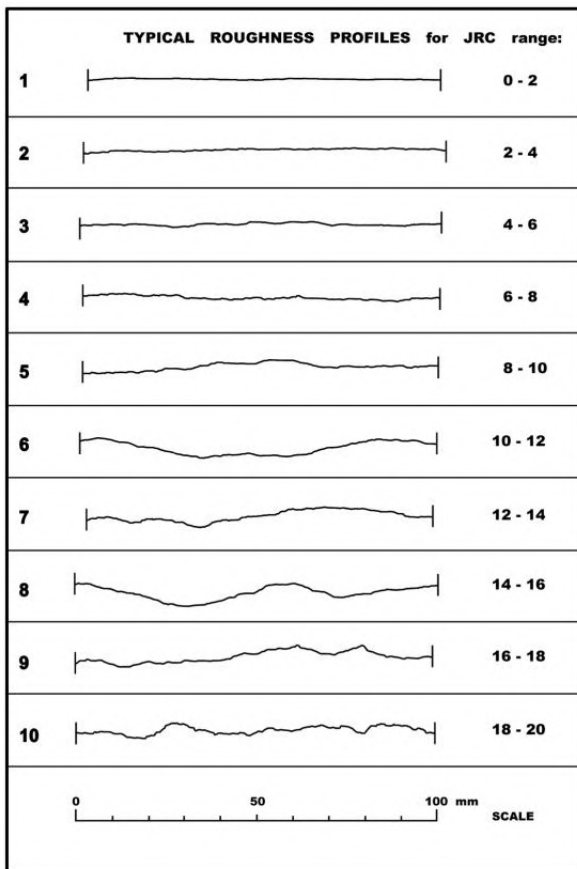


Figura 14.2.1.1: Profili tipici di rugosità secondo Barton & Choubey (1977).

Massa del campione (W)

Si tratta di un monitoraggio della massa di ogni provino "madre" 50x50x50 mm \pm 5 mm e 50x50x30 mm \pm 3 mm al fine di verificarne la variazione durante l'*aging test*. Come da Tab. 14.2.1.4 e Fig. 14.2.1.2, il monitoraggio è effettuato con uno step iniziale a ($T_T = 0$ giorni), successivamente ogni 15 giorni e finale ($T_T = 6$ mesi, 180 giorni).

Nella Tab. 14.2.1.5 è mostrata la variazione totale della massa relativa di ogni provino (Δ_{MT}) tra lo step di monitoraggio iniziale ($T_T = 0$ giorni) e finale ($T_T = 180$ giorni) e la perdita di massa media giornaliera relativa (Δ_{MG}).

Come si nota dalla Fig. 14.2.1.2 il trend di perdita in peso è differente in base alla litologia, al tipo di alterazione della roccia ed alla composizione dell'acqua utilizzata per la risalita capillare.

Nelle daciti/riodaciti (Fig. 14.2.1.2a) si nota che il trend della perdita in peso è rappresentato da una linea con pendenza piuttosto bassa in entrambi i campioni. Si nota come la pendenza della retta nel campione AN1, sottoposto a test di risalita capillare con acqua salata (RC_S) risulti leggermente più elevata. In questo campione la perdita in peso Δ_{MT} è pari a -0,37% mentre in AN2 $\Delta_{MT} = -0,19\%$. (Tab. 14.2.1.5). La decoesione dei campioni avviene mediante la perdita di residuo a grana molto fine (Fig. 14.2.1.3a, b) con $\Delta_{MG} = 0,002\%$ per AN1 e 0,001% per AN2.

Nella Fig. 14.2.1.2b è rappresentato il trend della perdita in peso dei campioni di pietra Forte PF1 e PF2, dove quest'ultimo è stato sottoposto a test di risalita capillare con acqua piovana RC_M mentre PF1 con acqua di falda RC_F . Si nota che le perdite in peso maggiori sono attribuite al campione PF1 ($\Delta_{MT} = -1,03\%$) mentre in PF2 $\Delta_{MT} = -0,3\%$ (Tab. 14.2.1.5).

La grande perdita in peso in PF1 è attribuita ad un processo di esfoliazione a $T_T = 135$ giorni dove è avvenuto il distacco di un grosso frammento di materiale da una frattura preesistente data probabilmente dallo stress fisico-meccanico subito dal provino durante il taglio.

Nella pietra Forte la perdita in peso avviene per disgregazione granulare di frammenti con granulometria $< 63\mu m$.

Nella pietra Cantone, (Fig. 14.2.1.2c) il trend della perdita in peso di materiale è rappresentato da curve complesse con inclinazioni variabili dovute ad una doppia modalità di decoesione della roccia, ovvero per disgregazione granulare ed esfoliazione.

Campione	Litologia	Massa (g)												
		0 giorni	15 giorni	30 giorni	45 giorni	60 giorni	75 giorni	90 giorni	105 giorni	120 giorni	135 giorni	150 giorni	165 giorni	180 giorni
AN1	Dacite/riodacite	279,72	279,70	279,56	279,36	279,19	279,11	279,07	279,02	278,95	278,86	278,82	278,73	278,69
AN2		291,99	291,97	291,82	291,77	291,73	291,70	291,65	291,62	291,58	291,54	291,52	291,47	291,44
PF1	Pietra Forte	305,30	305,27	305,23	305,21	305,19	305,17	305,12	305,11	305,06	305,04	302,23	302,20	302,15
PF2		302,27	302,22	302,17	302,11	302,03	301,95	301,80	301,76	301,75	301,66	301,55	301,48	301,37
PC1	Pietra Cantone	223,35	223,19	222,96	222,65	222,01	221,76	221,03	220,80	219,30	217,78	216,83	216,47	215,81
PC2		221,55	220,74	220,34	220,15	220,09	218,99	218,81	218,35	217,56	216,60	215,68	214,87	213,27
MA1	Marmo	191,75	191,66	191,56	191,45	191,40	191,36	191,34	191,32	191,31	191,25	191,21	191,17	191,12
MA2		190,12	190,10	190,09	190,03	190,00	189,90	189,78	189,74	189,73	189,73	189,70	189,67	189,64
BA1	Basalto	299,42	299,34	299,28	299,10	298,86	298,60	298,50	298,40	298,33	298,13	297,87	297,72	297,59
BA2		292,34	292,28	292,20	292,14	292,10	291,97	291,79	291,78	291,73	291,72	291,64	291,53	291,50
AT1	Arenaria	249,65	249,52	249,31	249,07	249,04	248,94	248,81	248,74	248,67	248,51	248,36	248,11	247,81
AT2		260,99	260,37	260,21	260,06	259,86	259,58	258,87	257,75	256,17	254,88	251,91	250,33	249,05
IGv1	Ignimbrite <i>facies</i> verdastra	206,44	206,43	206,41	206,39	206,38	206,36	206,33	206,31	206,25	206,22	206,09	206,07	206,04
IGv2		207,94	207,93	207,92	207,91	207,89	207,88	207,85	207,83	207,81	207,40	205,92	205,86	205,82
IGr1	Ignimbrite <i>facies</i> rossastra	195,17	195,16	195,14	195,11	195,09	195,07	195,05	195,03	194,98	194,95	194,89	194,83	194,77
IGr2		196,45	196,43	196,41	196,40	196,39	196,37	196,33	196,31	196,27	196,24	196,19	196,15	196,11

Tabella 14.2.1.4: Monitoraggio della massa dei campioni sottoposti ad *aging test* per un tempo totale di 180 giorni. Lo step di misurazione è avvenuto ogni 15 giorni.

Campione	Litologia	Massa pre-test M _{PRE} (g)	Massa post-test M _{POST} (g)	Perdita totale relativa Δ_{MT} (%)	Perdita media giornaliera relativa Δ_{MG} (%)
AN1	Dacite/riodacite	279,72	278,69	-0,37	-0,0020
AN2		291,99	291,44	-0,19	-0,0010
PF1	Pietra Forte	305,30	302,15	-1,03	-0,0057
PF2		302,27	301,37	-0,30	-0,0017
PC1	Pietra Cantone	223,35	215,81	-3,38	-0,0188
PC2		221,55	213,27	-3,74	-0,0208
MA1	Marmo	191,75	191,12	-0,33	-0,0018
MA2		190,12	189,64	-0,25	-0,0014
BA1	Basalto	299,42	297,59	-0,61	-0,0034
BA2		292,34	291,50	-0,29	-0,0016
AT1	Arenaria	249,65	247,81	-0,74	-0,0041
AT2		260,99	249,05	-4,57	-0,0254
IGv1	Ignimbrite <i>facies</i> verdastra	206,44	206,04	-0,19	-0,0011
IGv2		207,94	205,82	-1,02	-0,0057
IGr1	Ignimbrite <i>facies</i> rossastra	195,17	194,77	-0,20	-0,0011
IGr2		196,45	196,11	-0,17	-0,0010

Tabella 14.2.1.5: Perdita in massa relativa totale (Δ_{MT} %) e perdita media giornaliera relativa (Δ_{MG} %) dove:
 $\Delta_{MT} = (M_{PRE} - M_{POST}/M_{POST})100$; $\Delta_{MG} = \Delta_{MT}/180$.

Si nota come in PC2 il valore di perdita in peso relativo giornaliero Δ_{MG} sia pari a 0,0208% con una perdita in peso totale Δ_{MT} di -3,74% (Tab. 14.2.1.5). In PC1 si ottiene $\Delta_{MT} = -3,38\%$ con una perdita media giornaliera $\Delta_{MG} = 0,0188\%$. Nella pietra Cantone la massa del residuo da decoesione presenta una granulometria fine derivante da una disgregazione granulare e frammenti più grossolani (sino a 0,5 mm) prodotti da esfoliazione (Fig. 14.2.1.3c, d).

Nei marmi, il campione MA1 soggetto a risalita capillare con acqua di falda RC_F, presenta una perdita in peso totale $\Delta_{MT} = -0,33\%$, mentre in MA2 si registra $\Delta_{MT} = -0,25\%$ (Tab. 14.2.1.5), con perdite in peso giornaliere molto basse nell'ordine di 0,0018 e 0,0014% per MA1 ed MA2 rispettivamente.

Nelle rocce basaltiche si assiste ad un trend di perdita in peso con $\Delta_{MT} = -0,61\%$ in BA1 ed $\Delta_{MT} = -0,29\%$ in BA2. Nei basalti, le soluzioni acquose saline usate per i test di risalita capillare, in questo caso acqua di mare in BA1, sono determinanti nell'accelerare il processo di decoesione del litotipo, a differenza delle soluzioni meteoriche come quella usata in BA2. Il residuo da decoesione delle rocce basaltiche consiste in frammenti con granulometria $< 63 \mu\text{m}$ (Fig. 14.2.1.3e, f) per perdite medie giornaliere relative $\Delta_{MG} = 0,0034\%$ in BA1 e 0,0016% in BA2.

Nel campione di arenaria AT2 si nota che l'effetto della risalita capillare con acqua di mare abbia influito pesantemente sulla perdita in peso del campione. Rispetto ad AT1, infatti, si ha una perdita in peso per decoesione molto più elevata con $\Delta_{MT} = -4,57$ vs $\Delta_{MT} = -0,74$ (Fig. 14.2.1.2f, Tab. 14.2.1.5).

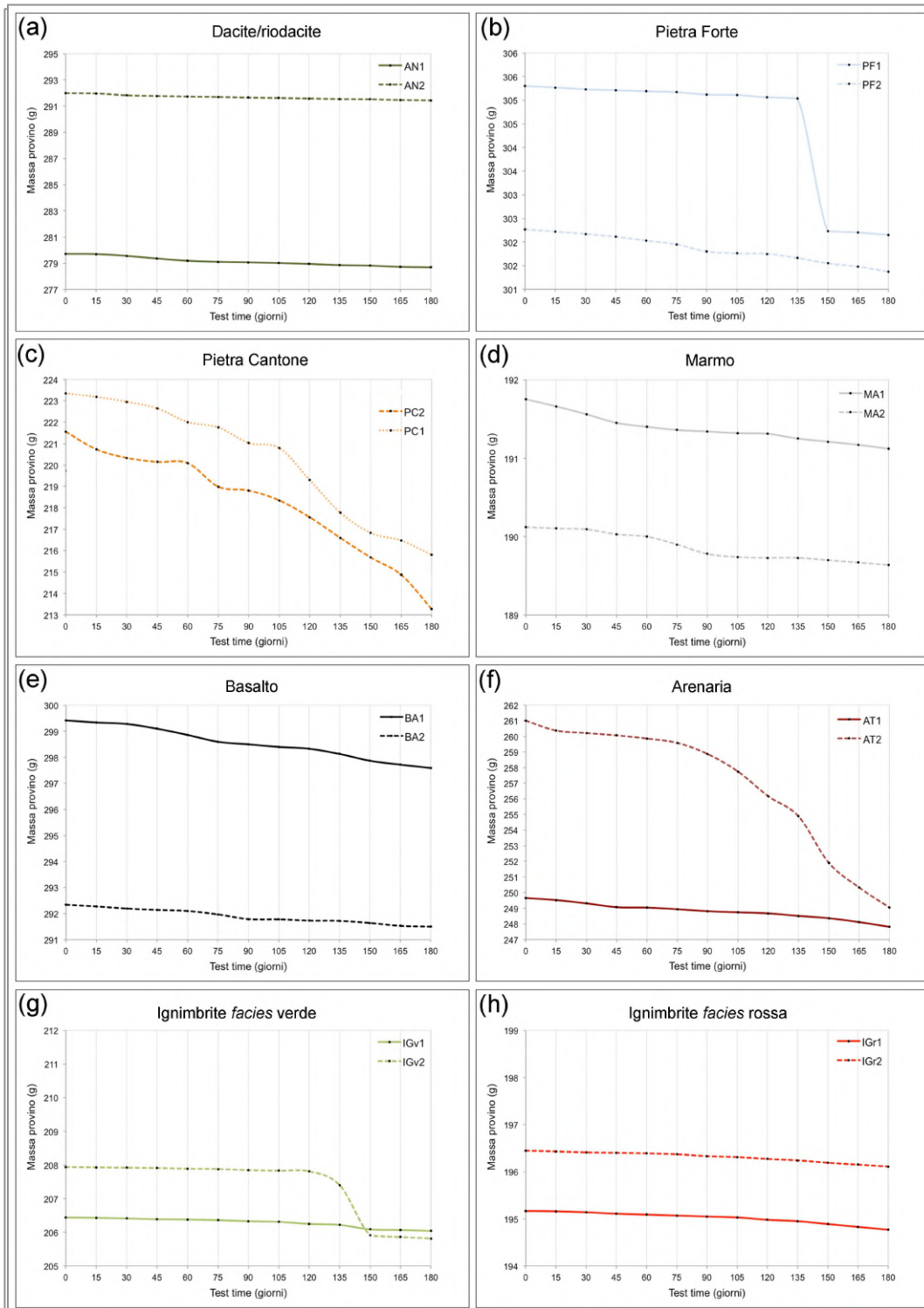


Figura 14.2.1.2: Monitoraggio della massa dei campioni sottoposti ad *aging test* per un tempo totale di 180 giorni. Lo step di misurazione è avvenuto ogni 15 giorni.

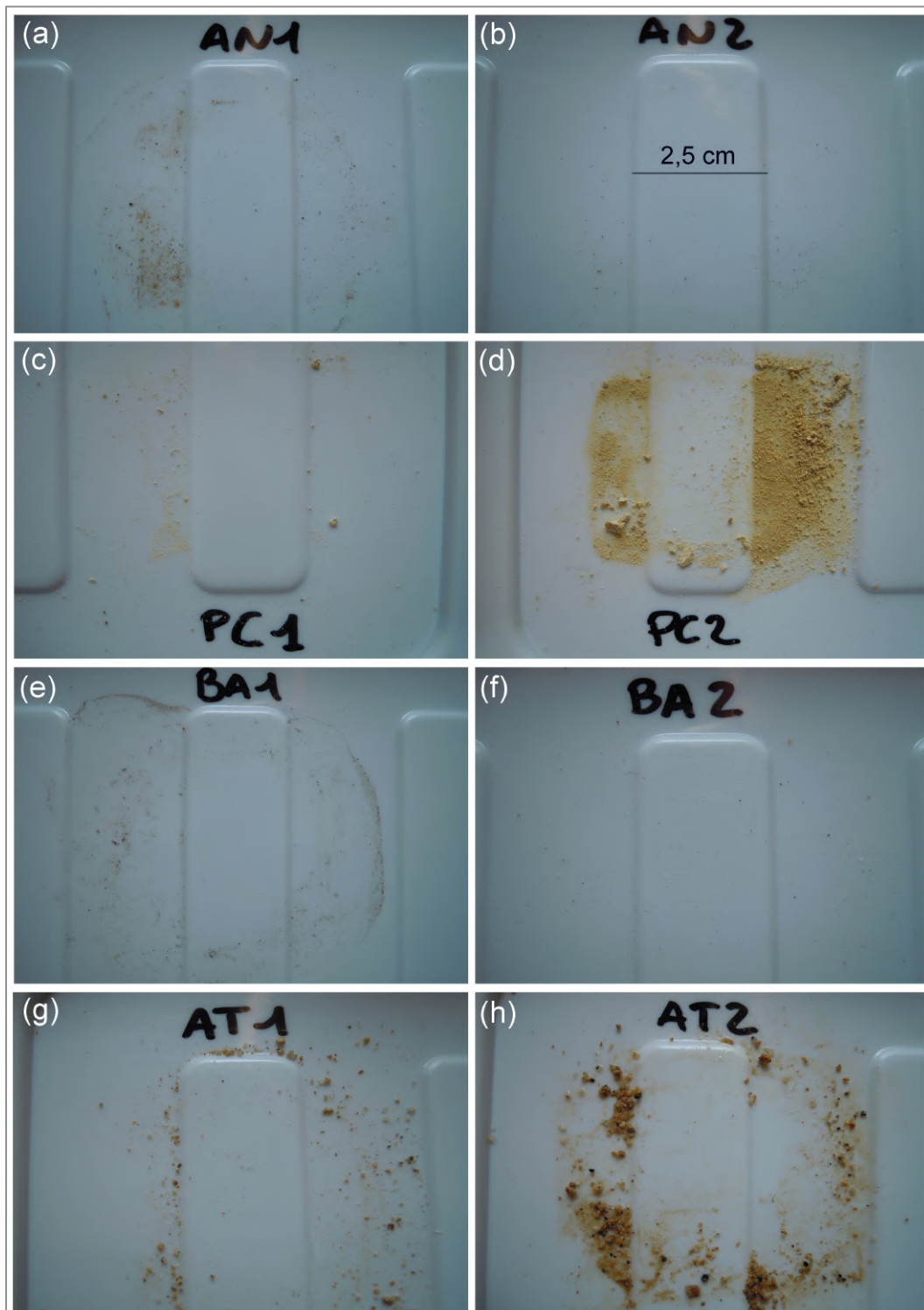


Figura 14.2.1.3: Residuo da decoesione dei campioni sottoposti ad *aging test*. (a) dacite/riodacite AN1, (b) dacite/riodacite AN2, (c) Pietra Cantone PC1, (d) Pietra Cantone PC2, (e) basalto BA1, (f) basalto BA2, (g) arenaria AT1, arenaria AT2.

La perdita in peso giornaliera è invece pari a 0,0041% in AT1 e 0,0254% in AT2. In Fig. 14.2.1.2f si nota come la curva indotta dalla decoesione dell'arenaria segue un andamento completamente diverso nei due campioni. In AT2, una leggera perdita in peso nelle prime fasi di test ($0 < T_T < 75$ giorni) è seguita da una forte rottura di pendenza a $T_T = 75$ giorni, in cui la roccia inizia una

decoesione con produzione di frammenti con granulometria $0,01 < \Phi < 3\text{mm}$ (Fig. 14.2.1.3h). Nel campione sottoposto a risalita capillare con acqua meteorica, si verifica invece una decoesione pressoché costante.

Nelle ignimbriti si registra una perdita in peso piuttosto esigua che sembra non dipendere dalla *facies* cromatica. Nelle litologie di colorazione rossastra, si registra in 6 mesi di test una perdita in peso totale pressoché simile in IGr1 ed IGr2 pari a -0,20% e -0,17% del peso totale con $\Delta_{MG} = 0,0011\%$ e $0,001\%$.

Nella *facies* verdastra, i trend di perdita in peso e l'inclinazione della curva di decoesione di IGv1 (Tab. 14.2.1.4, Fig. 14.2.1.3g) sono piuttosto simili a IGr1 ed IGr2. Lo è anche il valore di Δ_M pari a -0,20% con $\Delta_{MG} = 0,0011\%$ (Tab. 14.2.1.5).

In IGv2 la rottura di pendenza della retta di disgregazione a $120 < T_T < 150$ giorni è causata dalla perdita di due frammenti grossolani di materiale.

Densità reale (ρ_R), densità apparente (ρ_B), coefficiente d'imbibizione (Ci_w), porosità aperta all'elio (Φ_{He}), porosità aperta all'acqua (Φ_{H_2O}), indice di saturazione (S.I.)

Per lo studio delle proprietà fisiche, come già precisato, 5 provini "pilota" di dimensioni 20x20x20 mm sono stati ricavati dal medesimo blocco litoide in ognuno dei provini maggiori 50x50x50 mm \pm 5 mm e 50x50x30 mm \pm 3 mm e sottoposti, in camera FITOCLIMA, alle stesse condizioni di T, rH, CO₂ e RC del provino "madre". Ciò è stato necessario poiché i provini di dimensioni maggiori, dato il loro elevato volume, non potevano essere collocati nella cella del picnometro e nella relative bilance di precisione (Vedi Capitolo 13).

In Tab. 14.2.1.6, e 14.2.1.7 è riportata la media aritmetica di ρ_R , ρ_B , Ci_w , Φ_{He} , Φ_{H_2O} , ed S.I. dei 5 campioni pilota pre e post *aging test* relativi ai soli provini sottoposti a risalita capillare con acque RC_F, RC_S, RC_T escludendo quelli RC_M.

Litologia	Campione madre di afferenza	Condizioni ambientali in camera FITOCLIMA		Densità reale	Densità apparente	Coefficiente imbibizione	Porosità aperta all'elio	Porosità aperta all'acqua	Indice di saturazione
				ρ_R (g/cm ³)	ρ_B (g/cm ³)	Ci_w (%)	Φ_{He} (%)	Φ_{H_2O} (%)	S.I. (%)
Dacite/riod.	AN1	T, rH, CO ₂ , RC _S	M.A.	2,67	1,65	11,10	23,44	22,02	94,00
			D.S.	0,01	0,07	0,47	0,70	0,85	3,89
Pietra Forte	PF1	T, rH, CO ₂ , RC _F	M.A.	2,71	2,48	2,98	8,46	7,37	87,07
			D.S.	0,01	0,01	0,25	0,43	0,60	2,76
Pietra Cantone	PC2	T, rH, CO ₂ , RC _F	M.A.	2,70	2,11	8,68	21,71	18,29	84,25
			D.S.	0,01	0,05	0,97	1,98	1,61	1,19
Marmo	MA1	T, rH, CO ₂ , RC _F	M.A.	2,72	2,62	1,15	3,95	2,99	75,80
			D.S.	0,01	0,05	0,18	0,64	0,45	1,76
Basalto	BA1	T, rH, CO ₂ , RC _S	M.A.	2,82	2,39	4,46	15,25	10,58	69,00
			D.S.	0,01	0,09	1,17	3,09	2,44	3,46
Arenaria	AT2	T, rH, CO ₂ , RC _S	M.A.	2,67	1,65	19,95	38,27	32,76	85,62
			D.S.	0,01	0,07	2,12	2,28	2,29	3,31
Ignimbrite facies verdastra	IGv1	T, rH, CO ₂ , RC _T	M.A.	2,56	1,63	18,94	36,32	30,58	84,17
			D.S.	0,03	0,10	3,45	4,07	3,61	2,62
Ignimbrite facies rossastra	IGr1	T, rH, CO ₂ , RC _T	M.A.	2,57	1,59	20,55	37,96	32,57	85,76
			D.S.	0,04	0,09	3,11	3,60	3,36	2,28

Tabella 14.2.1.6: Caratterizzazioni fisiche pre-test relative alle 7 litologie selezionate. M.A. = media aritmetica, D.S. = deviazione standard.

Nella Tab. 14.2.1.8, 14.2.1.9 e 14.2.1.10 sono riportate le differenze relative delle varie proprietà fisiche in fase pre- e post-test.

Si nota una diminuzione della densità reale in alcuni campioni come dacite/riodacite, pietra Cantone, marmo ed arenaria. Nei calcari e nell'arenaria Tirreniana, una diminuzione della densità reale potrebbe essere dovuta ad un processo di solfatazione che porta la sostituzione di parte della calcite (densità = 2,71 g/cm³) con fasi più leggere come gesso (densità = 2,3 g/cm³). Ciò però non

sembra essere avvenuto nel calcare pietra Forte probabilmente, a causa di una più difficoltosa circolazione dell'acqua entro la roccia, dovuta alla bassa porosità o in parte anche ad una differente dimensione e superficie specifica dei cristalli di calcite.

Nel basalto, nella pietra Forte e nell'ignimbrite di entrambe le *facies* cromatiche, una probabile precipitazione all'interno dei pori di fasi cristalline secondarie indotte dal processo di evaporazione delle acque saline di risalita capillare, potrebbe aver portato ad un leggero aumento della densità reale.

Nella maggior parte delle litologie analizzate si registra un aumento della porosità aperta all'elio (o interconnessa) dovuto probabilmente ad un allargamento dimensionale dei pori aperti e anche alla apertura di pori originariamente chiusi (non interconnessi). Tale processo potrebbe essere dovuto alla pressione di cristallizzazione dei sali, che in taluni casi potrebbero aver portato alla formazione di microfessurazioni. Una diminuzione di porosità aperta come quelle registrate nella pietra Forte (-20,79%) e della ignimbrite a *facies* verdastra (-9,01%), potrebbero essere dovute ad una ostruzione dei pori aperti da parte di residuo da decoesione.

Litologia	Campione madre di afferenza	Condizioni ambientali in camera FITOCLIMA		Densità reale	Densità apparente	Coefficiente imbibizione	Porosità aperta all'elio	Porosità aperta all'acqua	Indice di saturazione
				ρ_R (g/cm ³)	ρ_B (g/cm ³)	CI _w (%)	Φ_{He} (%)	Φ_{H_2O} (%)	S.I. (%)
Dacite/riodacite	AN1	T, rH, CO ₂ , RC _S	M.A.	2,66	1,92	14,09	27,86	26,97	96,70
			D.S.	0,02	0,04	1,39	1,36	2,16	4,12
Pietra Forte	PF1	T, rH, CO ₂ , RC _F	M.A.	2,73	2,55	2,19	6,70	5,56	83,26
			D.S.	0,01	0,02	0,33	0,98	0,80	6,64
Pietra Cantone	PC2	T, rH, CO ₂ , RC _F	M.A.	2,68	2,08	9,45	22,45	19,59	87,48
			D.S.	0,01	0,06	1,02	2,32	1,60	3,36
Marmo	MA1	T, rH, CO ₂ , RC _F	M.A.	2,71	2,60	1,26	4,38	3,27	74,19
			D.S.	0,01	0,04	0,48	1,53	1,18	2,74
Basalto	BA1	T, rH, CO ₂ , RC _S	M.A.	2,83	2,39	4,79	15,49	11,38	73,31
			D.S.	0,01	0,06	0,95	2,47	2,00	3,22
Arenaria	AT2	T, rH, CO ₂ , RC _S	M.A.	2,66	1,60	20,75	39,84	33,13	83,38
			D.S.	0,02	0,06	1,31	2,41	1,12	4,57
Ignimbrite <i>facies</i> verdastra	IGv1	T, rH, CO ₂ , RC _T	M.A.	2,57	1,67	17,16	33,05	28,51	86,24
			D.S.	0,01	0,16	2,35	3,52	3,31	2,82
Ignimbrite <i>facies</i> rossastra	IGr1	T, rH, CO ₂ , RC _T	M.A.	2,59	1,60	20,46	38,20	32,52	85,22
			D.S.	0,03	0,10	3,09	3,74	2,83	3,00

Tabella 14.2.1.7: Caratterizzazione fisica post-test relative alle 7 litologie selezionate. M.A. = media aritmetica, D.S. = deviazione standard.

I coefficienti d'imbibizione aumentano in tutti i campioni ad esclusione della pietra Forte e delle ignimbriti di entrambe le *facies*. Legati alla porosità efficace, i coefficienti d'imbibizione generalmente diminuiscono a causa dell'ostruzione dei pori probabilmente dovuta alla presenza di

un residuo da decoesione a grana molto fine sia all'interno del campione sia depositato sulle facce esterne.

Campione madre di afferenza	Litologia	ρ_R pre-test (g/cm ³)	ρ_R post-test (g/cm ³)	$\Delta\rho_R$ (%)	ρ_B pre-test (g/cm ³)	ρ_B post-test (g/cm ³)	$\Delta\rho_B$ (%)
AN1	Dacite/riodacite	2,67	2,66	-0,38	1,65	1,92	16,41
PF1	Pietra Forte	2,71	2,73	0,79	2,48	2,55	2,72
PC2	Pietra Cantone	2,70	2,68	-0,62	2,11	2,08	-1,56
MA1	Marmo	2,72	2,71	-0,31	2,62	2,60	-0,75
BA1	Basalto	2,82	2,83	0,14	2,39	2,39	-0,15
AT2	Arenaria	2,67	2,66	-0,29	1,65	1,60	-2,85
IGv1	Ignimbrite <i>facies</i> verdastra	2,56	2,57	0,64	1,63	1,67	2,52
IGr1	Ignimbrite <i>facies</i> rossastra	2,57	2,59	0,74	1,59	1,60	0,40

Tabella 14.2.1.8: Differenze relative di densità reale e densità apparente delle 7 litologie selezionate.

Campione madre di afferenza	Litologia	Φ_{He} pre-test (%)	Φ_{He} post-test (%)	$\Delta\Phi_{He}$ (%)	Φ_{H_2O} pre-test (%)	Φ_{H_2O} post-test (%)	$\Delta\Phi_{H_2O}$ (%)
AN1	Dacite/riodacite	23,44	27,86	18,88	22,02	26,97	22,48
PF1	Pietra Forte	8,46	6,70	-20,79	7,37	5,56	-24,54
PC2	Pietra Cantone	21,71	22,45	3,40	18,29	19,59	7,14
MA1	Marmo	3,95	4,38	10,76	2,99	3,27	9,22
BA1	Basalto	15,25	15,49	1,56	10,58	11,38	7,59
AT2	Arenaria	38,27	39,84	4,11	32,76	33,13	1,12
IGv1	Ignimbrite <i>facies</i> verdastra	36,32	33,05	-9,01	30,58	28,51	-6,77
IGr1	Ignimbrite <i>facies</i> rossastra	37,96	38,20	0,63	32,57	32,52	-0,17

Tabella 14.2.1.9: Differenze relative di porosità aperta all'elio e porosità aperta all'acqua delle 7 litologie selezionate.

Campione madre di afferenza	Litologia	CI_w Pre-test (%)	CI_w Post-test (%)	ΔCI_w (%)	S.I. Pre-test (%)	S.I. Post-test (%)	$\Delta S.I.$ (%)
AN1	Dacite/riodacite	11,10	14,09	27,00	94,00	96,70	2,87
PF1	Pietra Forte	2,98	2,19	-26,47	87,07	83,26	-4,36
PC2	Pietra Cantone	8,68	9,45	8,88	84,25	87,48	3,83
MA1	Marmo	1,15	1,26	9,80	75,80	74,19	-2,12
BA1	Basalto	4,46	4,79	7,46	69,00	73,31	6,25
AT2	Arenaria	19,95	20,75	3,99	85,62	83,38	-2,62
IGv1	Ignimbrite <i>facies</i> verdastra	18,94	17,16	-9,40	84,17	86,24	2,45
IGr1	Ignimbrite <i>facies</i> rossastra	20,55	20,46	-0,44	85,76	85,22	-0,63

Tabella 14.2.1.10: Differenze relative di coefficiente d'imbibizione ed indice di saturazione delle 7 litologie selezionate.

14.2.2 Caratteristiche meccaniche

Resistenza al punzonamento, compressione e trazione

Nelle Tab. 14.2.2.1 e Tab. 14.2.2.2 sono riportati i dati di resistenza al punzonamento, compressione e trazione dei provini in fase pre e post-test.

Litologia	Campione madre di afferenza	Condizioni ambientali in camera FITOCLIMA		Resistenza a punzonamento I _{S50} (MPa)	Resistenza a compressione R _C (MPa)	Resistenza a trazione R _T (MPa)
Dacite/riodacite	AN1	T, rH, CO ₂ , RC _S	M.A.	7,16	143,13	8,95
			D.S.	1,29	25,74	1,61
Pietra Forte	PF1	T, rH, CO ₂ , RC _F	M.A.	7,43	104,05	9,29
			D.S.	0,94	13,21	1,18
Pietra Cantone	PC2	T, rH, CO ₂ , RC _F	M.A.	1,33	18,66	1,67
			D.S.	0,07	0,96	0,09
Marmo	MA1	T, rH, CO ₂ , RC _F	M.A.	3,18	44,52	3,97
			D.S.	0,35	4,93	0,44
Basalto	BA1	T, rH, CO ₂ , RC _S	M.A.	7,04	140,76	8,80
			D.S.	0,90	17,96	1,12
Arenaria	AT2	T, rH, CO ₂ , RC _S	M.A.	0,69	9,68	0,86
			D.S.	0,12	1,71	0,15
Ignimbrite <i>facies</i> verdastra	IGv1	T, rH, CO ₂ , RC _T	M.A.	2,49	34,81	3,11
			D.S.	0,25	3,45	0,31
Ignimbrite <i>facies</i> rossastra	IGr1	T, rH, CO ₂ , RC _T	M.A.	2,05	28,67	2,56
			D.S.	0,57	7,93	0,71

Tabella 14.2.2.1: Caratterizzazione meccanica pre-test relative alle 7 litologie selezionate.

Nella dacite/riodacite, l'esposizione continua a sei mesi di cicli di T, rH, CO₂ e RC_S ha determinato una diminuzione delle resistenze meccaniche dei provini nell'ordine del 5,9% (Tab. 14.2.2.3).

Nei calcari di San Saturnino (pietra Cantone e pietra Forte) si assiste a variazioni di resistenze meccaniche pari a -19,32% e 0,36%. Nella pietra cantone la diminuzione della resistenza meccanica è in parte correlata con un aumento della porosità aperta ed una parziale sostituzione della calcite con la formazione di gesso, caratterizzato da una resistenza meccanica minore.

Nella pietra Forte si osserva un debole aumento della resistenza a trazione. Nel marmo si registra una diminuzione delle resistenze piuttosto basse nell'ordine del -1,7% dovute al fatto che il marmo è poco soggetto a processi di alterazione e degradazione.

Valori anche in questo caso piuttosto modesti di perdita di resistenza sono registrati nel basalto con -1,9% (Tab. 14.2.2.3).

Litologia	Campione madre di afferenza	Condizioni ambientali in camera FITOCLIMA	Resistenza a punzonamento		Resistenza a compressione	Resistenza a trazione
			I _{S50} (MPa)	M.A.	R _C (MPa)	R _T (MPa)
Dacite/riodacite	AN1	T, rH, CO ₂ , RC _S	M.A.	6,74	94,30	8,42
			D.S.	0,71	10,00	0,89
Pietra Forte	PF1	T, rH, CO ₂ , RC _F	M.A.	7,46	104,43	9,32
			D.S.	0,99	13,91	1,24
Pietra Cantone	PC2	T, rH, CO ₂ , RC _F	M.A.	1,08	15,06	1,34
			D.S.	0,09	1,30	0,12
Marmo	MA1	T, rH, CO ₂ , RC _F	M.A.	3,13	43,78	3,91
			D.S.	0,29	4,05	0,36
Basalto	BA1	T, rH, CO ₂ , RC _S	M.A.	6,91	96,70	8,63
			D.S.	0,26	3,59	0,32
Arenaria	AT2	T, rH, CO ₂ , RC _S	M.A.	0,46	6,46	0,58
			D.S.	0,09	1,22	0,11
Ignimbrite <i>facies</i> verdastra	IGv1	T, rH, CO ₂ , RC _T	M.A.	2,27	31,83	2,84
			D.S.	0,38	5,28	0,47
Ignimbrite <i>facies</i> rossastra	IGr1	T, rH, CO ₂ , RC _T	M.A.	1,54	21,60	1,93
			D.S.	0,24	3,37	0,30

Tabella 14.2.2.2: Caratterizzazione meccanica post-test relative alle 7 litologie selezionate.

Campione madre di afferenza	Litologia	I _{S(50)} Pre-test (MPa)	I _{S(50)} Post-test (MPa)	ΔI _{S(50)} (%)	R _C Pre-test (MPa)	R _C Post-test (MPa)	ΔR _C Pre-test (%)	R _T Pre-test (MPa)	R _T Post-test (MPa)	ΔR _T (%)
		AN1	Dacite/riodacite	7,16	6,74	-5,88	143,13	134,71	-5,88	8,95
PF1	Pietra Forte	7,43	7,46	0,36	104,05	104,43	0,36	9,29	9,32	0,36
PC2	Pietra Cantone	1,33	1,08	-19,32	18,66	15,06	-19,32	1,67	1,34	-19,32
MA1	Marmo	3,18	3,13	-1,66	44,52	43,78	-1,66	3,97	3,91	-1,66
BA1	Basalto	7,04	6,91	-1,86	140,76	138,15	-1,86	8,80	8,63	-1,86
AT2	Arenaria	0,69	0,46	-33,25	9,68	6,46	-33,25	0,86	0,58	-33,25
IGv1	Ignimbrite <i>facies</i> verdastra	2,49	2,27	-8,57	34,81	31,83	-8,57	3,11	2,84	-8,57
IGr1	Ignimbrite <i>facies</i> rossastra	2,05	1,54	-24,66	28,67	21,60	-24,66	2,56	1,93	-24,66

Tabella 14.2.2.3: Differenze relative (tra pre-test e post-test) di resistenza a punzonamento, compressione e trazione delle 7 litologie selezionate.

Nell'arenaria Tirreniana, la forte perdita di resistenza meccanica (33,5%, Tab. 14.2.2.3) è dovuta probabilmente al processo di solfatazione con sostituzione di parte del cemento carbonatico della roccia con il gesso, che porta inevitabilmente a resistenze meccaniche differenti. Nelle ignimbrite di *facies* verdastra e rossastra si verifica una forte perdita di resistenza meccanica in entrambi i campioni pari a -8,6 e -24,7%. Nella *facies verdastra* una diminuzione di porosità del -9,0% potrebbe essere parzialmente responsabile della perdita di resistenza meccanica. In IGr1 i campioni presentano un andamento piuttosto anomalo, una diminuzione di I_{S(50)}, R_C ed R_T non sembra essere correlata con la porosità che invece presenta una leggera diminuzione pari allo 0,63%.

Velocità delle onde compressionali (V_p)

La misurazione della velocità di propagazione delle onde P nei materiali è un metodo diagnostico non distruttivo che ha lo scopo di valutare le caratteristiche elasto-meccaniche, lo stato di alterazione e la qualità di un materiale (Lay & Wallace 1995).

Le inomogeneità a bassa scala dei lapidei, data da zone di alterazione o elementi di discontinuità, può alterare la velocità di propagazione del segnale ultrasonico, fornendo così dei valori di velocità generalmente più bassi di quelli relativi al corrispondente litotipo sano (Avseth et al. 2005). La velocità di propagazione di un'onda ultrasonica è direttamente proporzionale ad alcune caratteristiche intrinseche del litotipo fra cui ad esempio la densità ed il modulo di rigidità. Risulta invece inversamente proporzionale alla porosità totale del litotipo. La velocità di propagazione delle onde P, come da Tab. 13.1.2, Capitolo 13, è stata misurata in fase pre e post-test sui campioni "madre" 50x50x50 mm \pm 5 mm e 50x50x30 mm \pm 3 mm di Fig. 13.1.2 e 13.1.2.

In Tab. 14.2.2.4 ed Fig. 14.2.2.1 è illustrata la variazione del parametro V_p , prima e dopo l'*aging test*.

Campione madre di afferenza	Litologia	V_p pre-test (m/s)	V_p post-test (m/s)	ΔV_p (%)
AN1	Dacite/riodacite	4621	4435	-4,04
AN2		4585	4411	-3,78
PF1	Pietra Forte	5505	5131	-6,79
PF2		5520	5483	-0,69
PC1	Pietra Cantone	2832	2499	-11,76
PC2		2889	2204	-23,71
MA1	Marmo	5290	5172	-2,23
MA2		5522	5507	-0,28
BA1	Basalto	4988	4707	-5,63
BA2		4964	4737	-4,57
AT1	Arenaria	4068	3711	-8,78
AT2		4054	3379	-16,65
IGv1	Ignimbrite <i>facies</i> verdastra	2794	2633	-5,75
IGv2		2808	2753	-1,96
IGr1	Ignimbrite <i>facies</i> rossastra	2552	2483	-2,69
IGr2		2533	2519	-0,53

Tabella 14.2.2.4: Variazione della velocità dell'onda compressionale V_p nei campioni soggetti ad *aging test*.

Si nota immediatamente che in tutti i campioni l'*aging test* ha determinato una riduzione della velocità ultrasonica P del materiale. Le perdite di velocità sono essenzialmente legate alla diminuzione delle densità reali ed agli aumenti di della porosità.

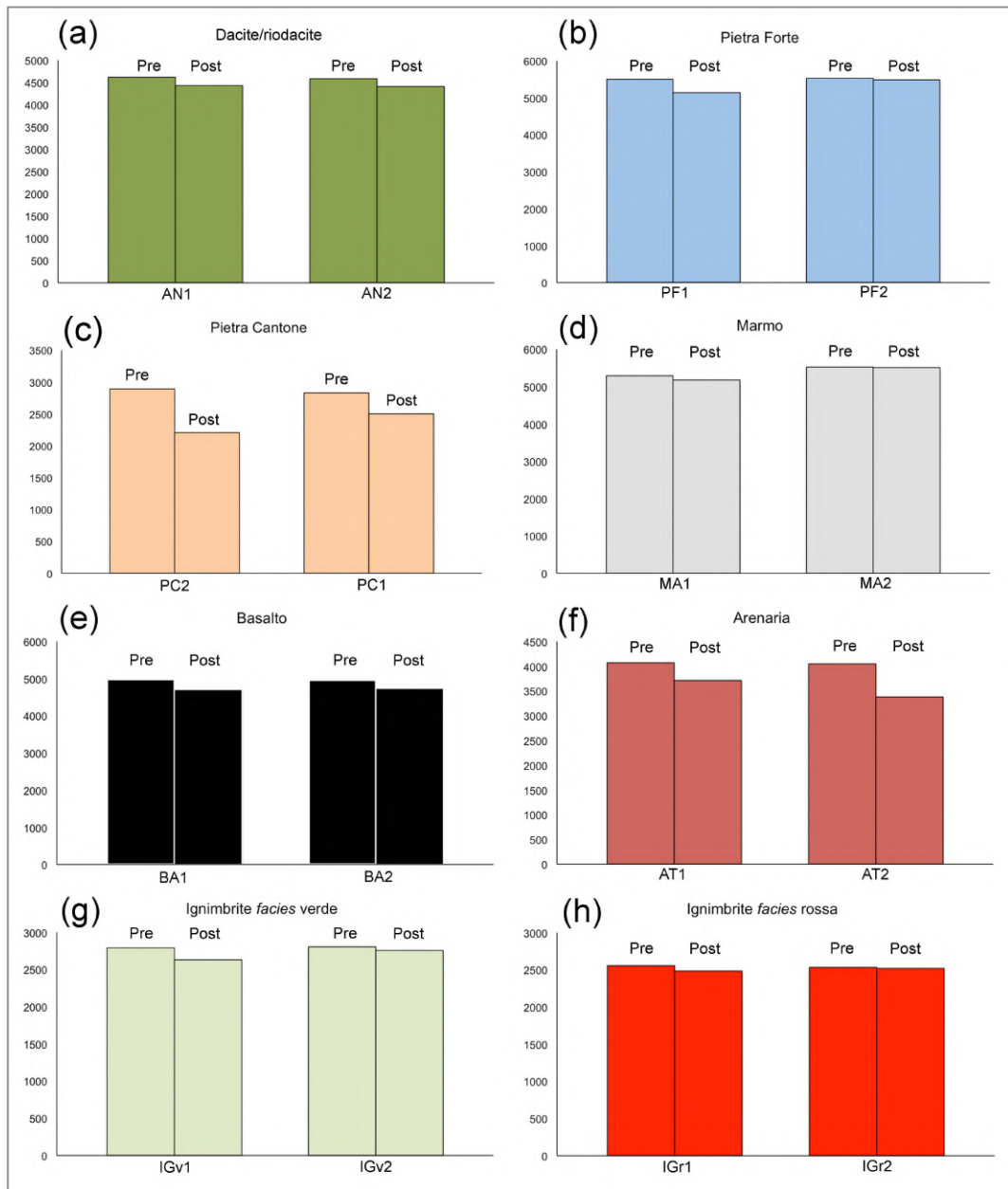


Figura 14.2.2.1: Variazione della velocità V_p in fase pre- e post-test nei campioni sottoposti ad *accelerated aging test*.

Le perdite di velocità più elevate si registrano nei campioni di pietra Cantone ed arenaria mentre le più basse nei marmi, nelle daciti/riodaciti e nelle ignimbriti in *facies* rossastra (Tab. 14.2.2.4).

Si nota come nei campioni soggetti a risalita capillare con acqua ad alto contenuto salino, la diminuzione di velocità ultrasonica sia più consistente rispetto ai campioni in cui la risalita capillare è avvenuta con acqua meteorica. Questo trend è visibile soprattutto nella pietra Forte, dove si nota una variazione di -6,8% in PF1 e solo -0,7% in PF2, ed anche nell'arenaria, dove si registra una perdita di -16,6% in AT2 e -8,8% in AT1. Significative differenze di velocità sulla base del tipo di

acqua utilizzata nella prova RC sono visibili anche nei campioni di pietra Cantone, dove PC2 presenta una differenza di -23,7%, mentre per PC1 si hanno valori di -11,8%.

Differenze di velocità meno consistenti si rilevano nei basalti, dove BA1 perde il 5,6% della velocità iniziale, mentre BA2 perde il 4,6%. La diminuzione della velocità nei campioni è direttamente correlata con la perdita in peso registrata in Fig. 14.2.1.2.

14.2.3 Dati mineralogici

Analisi delle efflorescenze

Le analisi micro-diffrattometriche (μ -XRD) delle efflorescenze (Tab. 14.2.3.1), sono state eseguite sui provini madre di dimensioni $50 \times 50 \times 50 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ e $50 \times 50 \times 30 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ Fig. 13.1.1, 13.1.2.

I provini sono stati analizzati in un punto specifico, in cui si è notata la comparsa di efflorescenze (Fig. 14.2.3.1), oppure su un punto sicuramente interessato dalla risalita capillare in cui le efflorescenze potrebbero essere presenti ma non visibili macroscopicamente.

Nelle daciti/riodaciti, (Tab. 14.2.3.1) la caratterizzazione μ -XRD mostra la presenza di minerali appartenenti alla paragenesi della roccia, quali plagioclasio, quarzo, pirosseno (diopside) e opachi (magnetite). Le efflorescenze sono presenti in entrambi i campioni e sono costituite da gesso, molto abbondante in AN1 ed in tracce in AN2. Il gesso deriva dall'interazione degli anioni SO_4^{-2} presenti nell'acqua di mare ed il calcio presente nella roccia in affioramento che rappresenta percentuali comprese tra 3,02% e 5,99% di CaO (Garau 2005). Cloruro di sodio (alite) è presente nel campione AN1 e deriva dall'acqua marina utilizzata per i test di risalita capillare RC_S .

Nella Pietra Forte, una elevata copertura di efflorescenze nel campione PF1 è dovuta alla presenza di cloruro di sodio e probabilmente di carbonato di calcio, composti presenti nell'acqua di falda utilizzata per i test di risalita capillare. Non è chiaro, infatti, se il carbonato di calcio rilevato in μ XRD derivi totalmente dal substrato calcareo della roccia o anche dalle efflorescenze di colorazione bianca (Fig. 14.2.3.1a) presenti sulla superficie.

Nella Pietra cantone, la presenza di calcite e quarzo sono riconducibili ai minerali di paragenesi della pietra. Gesso è presente PC2 ma anche in PC1 (Fig. 14.2.3.1b) dove la risalita capillare è stata effettuata con acqua piovana RC_M . In PC2, è stata rilevata la presenza di Epsomite ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), minerale che in natura deriva da depositi di salgemma o da efflorescenze capillari nelle regioni calcaree o dolomitiche.

Nei marmi non si rilevano macroscopicamente efflorescenze minerali. Tuttavia, l'analisi puntuale di MA1 ed MA2 nelle relative facce ABEF mostra la presenza di gesso ed alite nel campione MA1. Inoltre, la presenza di gesso è documentata nel campione MA2, sebbene in quantità minori (Tab. 14.2.3.1). Altre fasi minerali identificate nelle superfici dei marmi, oltre la calcite, sono: plagioclasio, muscovite e rutilo.

Nel campione di basalto BA1 (Fig. 14.2.3.1c) si rileva una presenza abbondante di gesso, così come nel campione BA2.

Nell'arenaria non si rileva la presenza di efflorescenze osservabili macroscopicamente, tuttavia sulla superficie di AT2 è possibile notare una fascia di accumulo di cloruro di sodio negli interstizi fra i cristalli (Fig. 14.2.3.1d). Nelle arenarie, ulteriori fasi minerali quali quarzo e plagioclasio si riferiscono ai granuli cristallini della frazione arenacea della roccia, mentre la presenza di calcite è dovuta al cemento carbonatico.

Nelle ignimbriti, fasi quali, plagioclasio, K-feldspato, quarzo, ortopirosseno e biotite appartengono alla paragenesi della roccia. Efflorescenze non risolvibili microscopicamente sono presenti in IGv1 come bloedite $\text{NaMg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (Tab. 14.2.3.1), fase minerale tipica dei depositi evaporitici probabilmente dovuta alla precipitazione dall'acqua termale usata nei test di risalita.

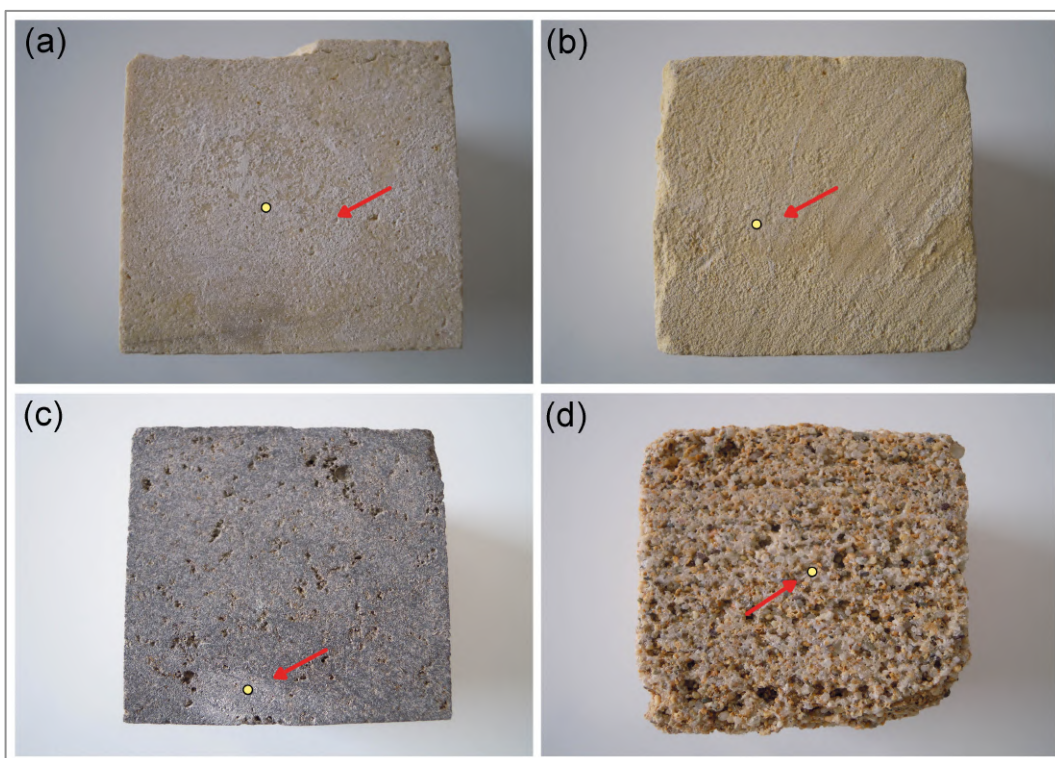


Figura 14.2.3.1: Esempi di efflorescenze macroscopicamente visibili localizzate sulle superfici dei campioni 5x5x5cm in fase post aging test. La freccia rossa indica le efflorescenze ed il punto giallo l'area di analisi in μXRD (a) Pietra forte PF1, faccia BCGF (b) Pietra cantone PC1, faccia ABEF, (c) Basalto BA1 faccia ABCD, (d) arenaria AT2 faccia AFEH.

Campione	Litologia	Punto di analisi	Cal	Qtz	Pla	K-f	Mus	Ges	Ali	Dio	Oli	Tit	Ens	Blo	Eps	Ru	Mag
AN1	Dacite/riodacite	Faccia EFGH	-	•	•••	-	-	•••	•	-	-	-	-	-	-	-	-
AN2		Faccia CDGH	-	-	-	-	-	Tr	-	••	-	-	-	-	-	-	•
PF1	Pietra Forte	Faccia BCGF	•••	-	•	-	-	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-
PF2		Faccia CDGH	•••	-	Tr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC1	Pietra Cantone	Faccia ABEF	•••	Tr	-	-	-	•	-	-	-	-	-	-	•	-	-
PC2		Faccia BCFG	•••	-	-	-	-	•••	Tr	-	-	-	-	-	-	•	-
MA1	Marmo	Faccia ABEF	•••	-	•	-	-	••	••	-	-	-	-	-	-	-	-
MA2		Faccia ABEF	•••	-	•	-	••	•	-	-	-	-	-	-	-	-	Tr
BA1	Basalto	Faccia EFGH	-	-	•••	-	-	••	-	-	•	-	-	-	-	-	-
BA2		Faccia ADEH	-	-	•••	••	-	-	-	-	-	-	•	-	-	-	-
AT1	Arenaria	Faccia ABEF	••	•••	•	-	-	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-
AT2		Faccia ADEH	•	•••	••	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IGv1	Ignimbrite verdastra	Faccia BCFG	-	••	••	••	-	-	-	-	-	-	-	••	-	-	-
IGv2		Faccia ADEH	-	••	••	••	••	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IGr1	Ignimbrite rossastra	Faccia CDGH	-	••	•••	••	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IGr2		Faccia EFGH	-	••	••	••	-	-	-	-	-	-	••	-	-	-	-

Tabella 14.2.3.1 Risultati delle analisi μ XRD sulle efflorescenze comparse nei provini sottoposti ad aging test. Cal = calcite, Qtz = quarzo, Pla = plagioclasio, K-f = K feldspato, Mus = muscovite, Ges = gesso, Ali = alite, Dio = diopside, Oli = olivina, Tit = titanite, Ens = enstatite, Blo = bloedite, Eps = epsomite, Ru = rutilo, Mag = magnetite. •••= Molto abbondante; ••=Abbondante; •Presente; Tr = presente in tracce; - = Non rilevato.

14.2.4 Caratteristiche colorimetriche

Luminosità (L), colore opponente a (a), colore opponente b (b),

La variazione del colore di ogni litologia campionata durante i sei mesi di test è stata studiata mediante un'esposizione solare continua simulata di $T_A = 6,4$ anni. I risultati delle variazioni dei parametri L , a , b in fase pre e post-test sono mostrati in Tab. 14.2.4.1.

Si nota che in alcuni campioni i parametri L , a e b variano rapidamente nelle prime fasi del test per poi assumere un trend piuttosto regolare.

Litologia	Luminosità pre-test	Luminosità post-test	Δ_L (%)	Colore a pre-test	Colore a post-test	Δ_a (%)	Colore b pre-test	Colore b post-test	Δ_b (%)
Dacite/riodacite	55,43	56,44	1,82	2,03	1,81	-10,84	6,19	5,22	-15,67
Pietra Forte	82,70	81,43	-1,54	0,55	0,48	-12,73	10,00	6,96	-30,40
Pietra Cantone	87,62	88,75	1,29	2,79	1,11	-60,22	18,59	17,33	-6,78
Marmo	81,77	79,02	-3,36	-1,04	-1,16	11,54	-2,22	-1,62	-27,03
Basalto	42,61	44,00	3,26	0,13	0,19	46,15	-0,79	-0,31	-60,76
Arenaria	60,92	62,19	2,08	3,39	4,00	17,99	11,59	11,48	-0,95
Ignimbrite <i>facies</i> verdastra	74,90	72,38	-3,36	-2,16	-2,11	-2,31	5,90	5,37	-8,98
Ignimbrite <i>facies</i> rossastra	71,11	68,16	-4,15	7,08	5,59	-21,05	10,32	9,07	-12,11

Tabella 14.2.4.1 Variazioni dei parametri L , a e b prima e dopo gli *aging test* in camera SOLARBOX.

Nella litologia dacitica/riodacitica (Fig. 14.2.4.1a, Tab. 14.2.4.1) si nota una variazione di colore piuttosto blanda con un debole aumento del parametro L (+1,8%) ed una conseguente diminuzione dei parametri a (-10,8%) e b (-15,7%). La variazione cromatica consiste in uno sbiancamento della pietra (aumento di L) con conseguente viraggio del colore iniziale verso tonalità del verde (aumento di a) e del blu (diminuzione di b).

Nella pietra Forte (Fig. 14.2.4.1b, Tab. 14.2.4.1) si ha un leggero inscurimento dato dalla perdita di -1,5% di luminosità, affiancata da un viraggio cromatico verso il verde e verso il blu dato dalle diminuzioni dei parametri a e b (-12,7% e -30,4%).

Nella pietra Cantone (Fig. 14.2.4.1c, Tab. 14.2.4.1) si ha una variazione in positivo di L (1,3%) che causa un leggero sbiancamento della pietra ed una conseguente forte diminuzione di a (-60,2%) che determina un viraggio verso il verde, ed una altrettanta diminuzione di b (-6,8%) che determina un viraggio verso il colore blu.

Nel campione di marmo, una perdita di luminosità di -3,4% determina un incurimento del materiale, mentre il parametro a aumenta dell'11,5% determinando un viraggio verso le colorazioni rosse. Nel marmo il colore opponente b diminuisce del -27,0% con un viraggio ancora una volta verso il colore blu.

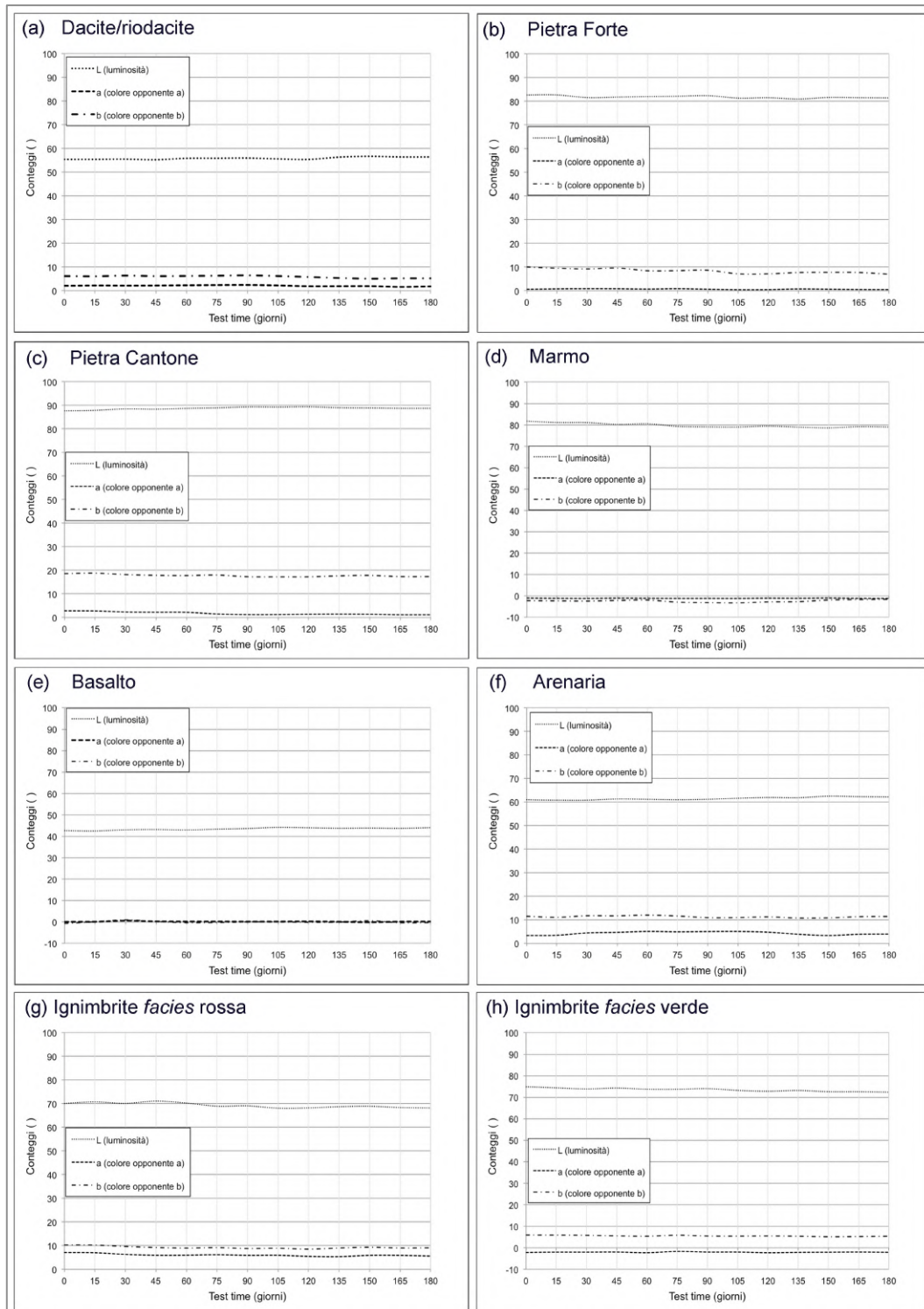


Figura 14.2.4.1: Variazioni dei parametri L, a e b durante i 180 giorni (6,4 anni di T_A) di test in camera SOLARBOX.

Nella litologia basaltica si nota una variazione di colore con un debole aumento del parametro L (+3,3%), un aumento del parametro a (46,2%) ed una diminuzione di b (-60,8%). La variazione cromatica consiste in un leggero sbiancamento della pietra (aumento di L) con conseguente viraggio del colore iniziale verso tonalità del rosso (aumento di a) e del blu (diminuzione di b).

Nell'arenaria, una notevole fluttuazione della curva cromatica determina, a fine test, un aumento del parametro L del 2,1% con variazione del colore opponente a e b pari a 18,0% e -0,9%.

Nelle due litologie ignimbritiche (Fig. 14.2.4.1g, h, Tab. 14.2.4.1) si hanno comportamenti simili con generale diminuzione della luminosità in entrambe le *facies* rossastra e verdastra ovvero $\Delta L = -4,1$ e $-3,4\%$ che consistono in un leggero inscurimento della roccia. Il colore opponente a diminuisce in entrambe le *facies* di $-21,1\%$ nella *facies* rossastra e $-2,3\%$ nella *facies* verdastra. Il colore opponente b diminuisce in entrambe le *facies* di $-12,1\%$ nella *facies* rossastra e $-9,0\%$ nella *facies* verdastra.

Durante i test si nota che i trend dei parametri misurati non presentano una pendenza continua ma sono spesso affetti da fluttuazioni. In letteratura alcuni autori (e.g., O'Donoghue 2006), affermano che la variazione di colore della pietra esposta ai raggi UV ed alla luce solare è in genere dovuta a processi di ossidazione della materia organica (quando presente) e di alcuni metalli, quali il ferro che può passare dallo stato Fe^{+2} a Fe^{+3} . Alcuni minerali, inoltre, risultano essere fotosensibili e sono soggetti a cambiamenti di colore in base al tempo/grado di esposizione alla luce solare. Tra questi minerali vi sono in particolare alcuni: topazio, grossularia, pirosseno, quarzo e calcite; questi ultimi due per altro presenti in buona parte dei campioni. È inoltre da evidenziare che nella SOLARBOX, cambiamenti di colore della roccia siano in parte dovuti ad altri processi di degrado quali per esempio l'ossidazione atmosferica o la temperatura all'interno della camera climatica ($50 < T < 60$ °C). Sebbene nel vano test le condizioni di rH, pressione, ecc., siano pressoché stabili, l'aumento della temperatura all'interno della camera è dovuto alla produzione di calore da parte della stessa lampada.

Tutte le variazioni dei parametri L, a e b registrate nei campioni non sono visibili dall'occhio umano poiché quest'ultimo è in grado di determinare soltanto variazioni oltre le 3-4 unità.

15 CONCLUSIONI

Il progetto di ricerca, con il suo approccio multidisciplinare, nell'ambito della petrografia applicata, la diagnostica sui beni culturali, l'archeologia e l'architettura, ha consentito di ottenere una vasta gamma d'informazioni archeometriche e diagnostiche sui materiali litoidi (rocce e malte), utili ai fini della comprensione delle tecnologie e delle modalità di costruzione degli edifici di epoca storica.

15.1 Le Piccole Terme ed il Teatro di Nora (Pula, Sardegna, Italia)

Le daciti/riodaciti di Monte su Casteddu, utilizzate a Nora nella costruzione del Teatro e di alcune altre strutture architettoniche del sito sono caratterizzate da ottime resistenze meccaniche. La roccia presenta un ridotto numero di alterazioni *in situ*, principalmente riassumibili in patine biologiche.

I test d'invecchiamento accelerato confermano che il degrado sul materiale è estremamente ridotto. Non si notano variazioni morfologiche apprezzabili nei campioni soggetti ad invecchiamento tuttavia, nel campione sottoposto alla prova di cristallizzazione salina con acqua marina, che riproduce fedelmente le condizioni *in situ*, si evidenzia un leggero incremento del degrado rispetto al campione sottoposto a bagnature con acqua meteorica, visibile soprattutto nelle curve di perdita in peso e nelle velocità ultrasoniche. La radiazione solare continua per un'esposizione totale di circa sei anni, provoca un leggero sbiancamento della pietra sebbene questa variazione cromatica non sia apprezzabile ad occhio nudo. In seguito agli aging test inoltre, la pietra mostra la comparsa di alcune efflorescenze minerali tipiche quali cloruro di sodio e gesso rilevate anche su monumento.

Nelle Piccole Terme, due grandi gruppi funzionali di malta quali intonaci arricci e allettamenti dei conci/laterizi presentano aggregati riassumibili in litoclasti, *Cocciopesto*, cristallo-clasti, bioclasti e carbone. Il *Cocciopesto* è presente soprattutto negli arricci mentre nelle malte di allettamento è stato rinvenuto solo in alcuni campioni. Litoclasti, cristallo-clasti e bioclasti, presenti in tutti i gruppi di malta, sono materiali prelevati nelle zone limitrofe del monumento ed appartenenti a formazioni geologiche locali conosciute.

La provenienza della materia prima calcarea usata per la produzione del legante è sconosciuta, tuttavia differenti gradi d'idraulicità tra malte con analogo rapporto L/A ed analoghe tipologie e percentuali di aggregato, suggeriscono il probabile uso di calcari della formazione di Cagliari caratterizzati da diversi contenuti in argille e quindi diversi gradi di pozzolanicità (e.g. pietra

Cantone, pietra Forte). Contatti fra l'antica *Karalis* e Nora sarebbero inoltre testimoniati dalla presenza di filari di roccia vulcanica andesitica utilizzati nella Basilica di San Saturnino, con tutta probabilità provenienti da affioramenti localizzati nell'agro di Pula.

La presenza abbondante di caolinite nelle malte di Nora potrebbe suggerire un'operazione di aggiunta minerale mediante tecnica di "caolinitizzazione", spesso usata in contesti Fenici e Bizantini. L'analisi granulometrica delle malte indica che le raccomandazioni di Vitruvio sono state seguite solo in parte durante la produzione degli impasti. Le malte presentano, infatti, sulla base degli spessori delle gettate, rapporti L/A mediamente più alti del dovuto (malte grasse) a fronte di granulometrie spesso uniformi.

15.2 La Basilica di San Saturnino (Cagliari, Sardegna, Italia)

La pietra Cantone e la pietra Forte utilizzate nella costruzione della basilica di San Saturnino, sono due litotipi caratterizzati da resistenze meccaniche molto differenti. Tali differenze sono ben visibili nelle caratteristiche petro-fisiche in cui si notano sostanziali differenze tra coefficienti d'imbibizione, porosità aperte all'elio e indice di punzonamento. *In situ* tutto ciò si traduce in un'erosione differenziale tra i due litotipi visibile per altro nelle cartografie di degrado. Nei test d'invecchiamento i litotipi subiscono due degradi differenti. Nella pietra Cantone si assiste a sfarinamento ed esfoliazione mentre nella pietra Forte si assiste ad una esigua perdita in peso per decoesione. Nella pietra Cantone il degrado, in termini soprattutto di perdita in peso e conseguente aumento della rugosità, avviene già nelle prime fasi del test d'invecchiamento accelerato. Si nota come il contatto con acqua di falda salina determina nella pietra Cantone una perdita in peso nettamente maggiore rispetto ai campioni sottoposti a risalita con acqua piovana. Il degrado è visibile anche macroscopicamente con la modifica della morfologia originaria del provino. Le pietre calcaree utilizzate nella costruzione della Basilica provengono da affioramenti locali situati nel vicino colle Bonaria mentre per i marmi, l'analisi isotopica dimostra una provenienza da Carrara e Greca.

Le malte di San Saturnino campionate in base alla stratigrafia archeologica del monumento e classificate in malte Romane e Medievali, presentano numerose affinità circa i rapporti L/A e le caratteristiche petro-fisiche indicando come probabilmente la manovalanza in periodo medievale abbia cercato di riprodurre malte con caratteristiche simili a quelle Romane già presenti *in situ*.

Nelle malte di entrambe le culture è stato utilizzato un aggregato composto da litoclasti e cristallo-clasti con *Cocciopesto* assente. Anche in questo caso gli aggregati provengono da formazioni geologiche locali e da sabbie marine recuperate negli arenili più prossimi al sito.

La materia prima calcarea usata nella produzione del legante, identificata in base al ritrovamento di “fantasmi” in sezione sottile, proviene dalle locali formazioni dei calcari di Cagliari. A conferma dell’uso di pietra Cantone e pietra Forte risultano le idraulicità delle malte variabili in funzione del tipo di calcare utilizzato nella produzione di legante.

15.3 Il lastricato del Cardo e le Terme II (Grandi Terme) di Tharros (Cabras, Sardegna, Italia)

I basalti e le arenarie del lastricato del Cardo di Tharros sono caratterizzati da resistenze meccaniche del tutto differenti. Tali differenze *in situ* si esplicano in processi di erosione differenziale sebbene l’accostamento fra i due litotipi sia piuttosto raro. Il basalto è di solito caratterizzato da coperture di patine biologiche e rare comparse di efflorescenze minerali (gesso) per altro riprodotte anche in camera climatica. Nell’arenaria, proveniente da cave locali, una struttura grano-sostenuta a cemento micro-sparitico favorisce una decoesione granulare in alcuni casi profonda che determina una drastica diminuzione delle capacità di resistenza meccanica della roccia mettendo a rischio la stabilità degli edifici. L’interazione tra basalto ed arenaria e l’acqua marina usata nella prova di cristallizzazione salina, determina una diminuzione di resistenza meccanica, perdita in peso e della velocità ultrasonica soprattutto nell’arenaria. Il campione di arenaria sottoposto a risalita capillare con acqua salina subisce profonde variazioni morfologiche evidenziate da un progressivo arrotondamento degli spigoli vivi.

Nelle malte campionate nell’area di Tharros si assiste all’utilizzo di aggregato di provenienza locale soprattutto cristallo-clasti provenienti dalle vicine spiagge.

Le sabbie quarzoso-feldspatiche fungono da inerte per conferire resistenza fisico-meccanica a livello microstrutturale.

Aggregato idraulicizzante nelle malte consiste in *Cocciopesto* e frammenti di ossidiana probabilmente provenienti dal vicino Monte Arci con evidenti bordi di reazione. Gli intonachini ed i calcestruzzi delle volte di Tharros risultano un gruppo di malte costituite da un legante fortemente idraulico probabilmente ricavato da una materia prima calcareo differente dalle altre malte, poiché dovevano avere delle ottime capacità di resistenza all’umidità degli ambienti termali e resistenza a flessione i secondi.

15.4 Il Forum Traiani (Fordongianus, Sardegna, Italia)

Le ignimbriti del Forum Traiani sono state cavate in una zona interna al sito che con tutta probabilità fungeva da area mineraria anche per edifici più distanti quali l'anfiteatro. La pietra presenta delle ottime caratteristiche meccaniche che gli consentono di resistere al degrado causato dall'acqua termale fortemente salina ancora presente all'interno del sito. Il processo di risalita capillare riprodotto in camera climatica con acqua prelevata dal sito, provoca nella roccia la comparsa di efflorescenze minerali non apprezzabili macroscopicamente quali ad esempio bloedite. *In situ* la pietra, a causa della sua elevata capacità di ritenzione, è soggetta ad esfoliazioni, coperture di patine biologiche ed in alcuni casi di crescita di piante superiori.

Nelle malte di Forum Traiani sono emerse una moltitudine di informazioni utili nella comprensione delle modalità di preparazione degli impasti. L'idraulicità della malta era assicurata dalla presenza di *Cocciopesto* e polvere di carbone di quercia. L'analisi in sezione sottile dei frammenti di *Cocciopesto* mostravano la presenza di ceramiche con differenti distribuzioni granulometriche e quantità di dimagrante quarzoso. Spesso i frammenti presentavano un'orientazione dello stesso smagrante ad indicare ceramiche lavorate mediante metodo di tornitura o simili. Negli intonachini, la composizione di alcuni affreschi parietali indicava la presenza di pigmenti derivati da ossidi ed idrossidi di ferro per le colorazioni arancio e rosso. Il tipo di pigmento utilizzato è analogo a quelli utilizzati anche in costruzioni Romane situate nei dintorni della Capitale. L'analisi di alcune stratigrafie di malte ha evidenziato come il sito è stato probabilmente interessato da eventi alluvionali che hanno portato ad alcuni interventi di restauro nelle murature.

15.5 Confronti fra risultati

I dati archeometrici relativi alle malte dei siti archeologici in studio mostrano come spesso i costruttori non abbiano seguito le raccomandazioni di Vitruvio durante la produzione. È comunque da precisare che assistere ad interi campionamenti di malte in cui vengano rispettate tutte le raccomandazioni è un evento piuttosto raro. I suggerimenti di Vitruvio sono stati utilizzati prevalentemente nei dintorni di Roma e per un ristretto periodo temporale successivo al libro "De architectura". Da precisare che, in ogni caso, questo non ha comportato la produzione di malte con caratteristiche scadenti poiché monumenti realizzati con criteri differenti a quelli suggeriti dall'architetto, ancora oggi risultano relativamente ben conservati.

Le malte presentano di solito presenza di grumi di calce derivati soprattutto da una scarsa miscelazione dell'impasto. Spesso si assiste a malte con rapporti L/A non inversamente proporzionali allo spessore delle gettate come è accaduto nella malte di Nora o a malte con rapporti L/A piuttosto elevati. In alcuni altri casi, come avvenuto a San Saturnino, la malta non presenta *Cocciopesto* nell'impasto e l'idraulicità del materiale è attribuita soltanto al legante ed ai litoclasti.

Il *Cocciopesto* è stato utilizzato in tutti gli altri monumenti in studio preferibilmente in alcune tipologie di malte, quali i calcestruzzi pavimentali, i *Trullissatio* e le malte di allettamento dei conci/laterizi dove forniva, nel contempo, idraulicità e un alleggerimento delle gettate.

In alcuni casi le disposizioni di Vitruvio sono state rispettate nell'utilizzo di polvere di carbone di quercia idraulicizzante come nel caso delle malte del Forum Traiani e Nora. Interessante è il caso degli intonachini di Tharros, gli unici a presentare aggregato calcareo di colorazione bianca al fine che questo non risaltasse cromaticamente rispetto al legante.

Nelle malte di solito non viene rispettata la composizione del fuso granulometrico, spesso di tipo uniforme, contrariamente a quanto necessario per risparmiare legante ed aumentare le resistenze meccaniche della malta.

Nella produzione delle malte si assiste, come spesso comune negli edifici Romani, al prelievo di geo-materiali nelle vicinanze del sito. Questo avviene a prescindere dalla qualità dello stesso materiale, operazione realizzata al fine di abbattere i costi di trasporto. Nel caso delle malte di Tharros, contrariamente, materiale ossidianaceo proveniente da cave distanti è stato utilizzato come aggregato idraulicizzante.

15.6 Considerazioni conclusive generali

I dati ricavati dal progetto, in particolare quelli archeometrici, offrono preziose informazioni utili per pianificare un'eventuale intervento di restauro sul monumento, come ad esempio la sostituzione di elementi strutturali fortemente degradati o la produzione di malte *repair*. Ciò è dovuto al fatto che le analisi effettuate hanno permesso di conoscere la provenienza di gran parte dei geo-materiali, quali le pietre e le materie prime utilizzate nella produzione delle malte. Si conoscono inoltre i rapporti di miscelazione L/A e le caratteristiche fisico-meccaniche della malta.

Nelle pietre le informazioni rilevate con le cartografie del degrado e le osservazioni *in situ* hanno fornito informazioni utili circa le cause delle degradazioni ed alterazioni nei monumenti oggetto di studio. Ciò ha il fine di indirizzare un'eventuale opera di restauro come la sostituzione di conci fortemente degradati. Questo sarebbe necessario soprattutto nella Basilica di San Saturnino, dove,

lo sfarinamento profondo della pietra Cantone in alcune zone potrebbe in un prossimo futuro compromettere la stabilità dell'edificio.

Il degrado riscontrato su tali monumenti non è, per il momento, tale da mettere a rischio la stabilità degli edifici; tuttavia, i test di degrado accelerato sulle litologie studiate hanno dimostrato che per alcune rocce quali la stessa pietra Cantone e in particolare l'arenaria, la decoesione aumenta sempre più rapidamente col passare del tempo.

Ricordiamo inoltre che gran parte degli edifici studiati sono ubicati in un ambiente marino. Per tale motivo a San Saturnino ma anche nei monumenti di Tharros, e Nora, l'esposizione delle strutture a venti forti con carico salino in sospensione accelera il processo di degrado di rocce e malte producendo danni da cristallizzazione di sali (cloruro di sodio, solfati) soprattutto su malte e rocce porose. Nel caso dei basalti di Tharros, la presenza di aerosol marino produce invece una lenta (ma costante) disgregazione granulare, così come evidenziato in laboratorio dai risultati degli *aging test*. Oltre ai fattori di rischio esterno, in alcuni monumenti quali le terme di Forum Traiani, acque termali di risorgiva di *facies* idrogeochimica cloruro-sodica e solfatica hanno interagito (e interagiscono tutt'oggi) con le malte antiche degli edifici Romani, portando alla formazione di fasi secondarie dannose, contribuendo così in modo sostanziale al loro degrado, soprattutto degli intonaci e degli affreschi ubicati nelle strutture U. Il sito, inoltre, collocato in una zona a rischio idrogeologico, è soggetto ed è stato soggetto anche in passato ad allagamenti che costrinsero a diversi interventi di restauro, come dimostrano i risultati delle analisi composizionali della stratigrafia "p" delle malte parietali campionata nel *Frigidarium*.

Nei test in camera climatica, l'esposizione dei provini lapidei a variazioni di temperatura, umidità relativa, anidride carbonica, radiazione solare e cristallizzazione salina ha consentito di ricreare fedelmente le condizioni microclimatiche simili a quelle del territorio in cui sono ubicati i siti archeologici presi in esame. Durante gli *aging test* in camera FITOCLIMA, i campioni hanno subito un degrado che ha sempre comportato un sensibile decremento delle capacità di resistenza meccanica dei materiali, dovuto nella maggior parte dei casi ad un aumento della porosità interna.

Si è notato inoltre che nei test di risalita capillare le acque ad alto contenuto salino, risultino determinanti nel degrado dei materiali lapidei. In camera SOLABOX invece l'alterazione cromatica delle pietre è stata evidenziata dalle analisi colorimetriche ma risulta non apprezzabile dall'occhio umano poiché in linea generale le variazioni dei parametri L, a, b sono sempre inferiori alle tre 3-4 unità.

Referenze

ASTM D5312 (2013) Standard test method for evaluation of durability of rock for erosion control under freezing and thawing conditions, ASTM Standards.

EN 12370 (2001) Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della resistenza alla cristallizzazione dei sali CNR-ICR, Roma.

INSTITUT FÜR MINERALOGIE UND PETROGRAPHIE (2000) Preparation of glass beads and powder pills for XRF analysis of silicic and calcareous rocks (standard version).

IPCC (2001) Third Assessment Report: Climate Change (TAR).

ISRM, International Society For Rock Mechanics (1972) Suggest method for determining the point load strength index. ISRM (Lisbon, Portugal). Committee on field tests. 1:8-12.

ISRM, International Society For Rock Mechanics (1985) Suggest method for determining the point load strength. ISRM commission for testing methods, Working group on revision of the point load test methods. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr. 22:51-60.

CNR-ICR Nor.Ma.L - 1/88, L'abaco dei degradi.

CNR-ICR Nor.Ma.L - 2/80, Archiviazione di Materiali Lapidei.

CNR-ICR Nor.Ma.L - 3/80, Materiali Lapidei: Campionamento.

MiBAC (2008) La valorizzazione dei siti archeologici: Obiettivi, strategie e soluzioni. XI borsa mediterranea del turismo archeologico. MP Mirabilia SRL Ed.

Acquaro E., Finzi C. (1999) Tharros, Sardegna Archeologica. Carlo Delfino.

Aliatis I., Bersani D., Campani E., Casoli A., Lottici P.P., Mantovan S., Marino I.G. (2010). Pigments used in Roman wall paintings in the Vesuvian area. J. Raman Spectrosc. <https://doi.org/10.1002/jrs.2701>

Antonelli F., Lazzarini L. (2015) Un updated petrographic and isotopic reference database for white marbles used in antiquity. Rend. Fis. Acc. Lincei, 26:399-413.

Antonelli F., Lazzarini L., Cancelliere S., Dessandier D. (2009) Volubilis (Meknes, Morocco): archaeometric study of the white and coloured marbles imported in the Roman age. J. Cult. Herit., 10(1):16-123.

Assorgia A., Barca S., Spano C. (1997) Lineamenti tettonici e magmatici del terziario della Sardegna. In: Atti del convegno sulla fossa Sarda. Villanovaforru, Sardegna, Italia.

Attanasio D., Bruno M., Prochaska W., Yavuz A.B. (2015) A multi-method database of the black and white marbles of Göktepe (Aphrodisias), including isotopic, EPR, trace and petrographic data. Archaeometry, 57(2):217-245.

Attanasio D., Brilli M., Ogle N. (2006) The Isotopic Signature of Classical Marbles. L'Erma di Bretschneider, Roma.

- Attanasio D., Mesolella G., Pensabene P., Platania R., Rocchi P. (2009) EPR and petrographic provenance of the architectural white marbles of three buildings at Villa Adriana. In: Maniatis, Y. (Ed.), *Asmosia VII. Proceeding 7th International Conference ASMOSIA, Thassos 2003*, Bulletin de Correspondance Hellenique Sup., 51, Athens, pp. 57-369.
- Attanasio D., Yavuz A.B., Bruno M., Herrmann Jr J.J., Tykot R.H., Van Den Hoek A. (2012) On the Ephesian origin of greco scritto marble. In: Gutierrez Garcia, A., Lapuente, P., Roda, I. (Ed.), *Interdisciplinary Studies on Ancient Stone. Proceedings of the IX ASMOSIA Conference (Tarragona 2009)*, pp. 245-254.
- Atzeni C., Cara S., Sanna U., Sistu G. (1991) Restauro dell'edilizia storica nella città di Cagliari: il ruolo della caratterizzazione dei materiali calcarei nelle antiche cave. *Kermes anno IV CNR – La ricerca*.
- Avseth P., Mukerji T., Mavko G. (2005) *Quantitative seismic interpretation*. Cambridge.
- Bakolas A., Biscontin G., Contardi V., Franceschi E., Moropoulou A., Palazzi D., Zendri E. (1995) Thermoanalytical research on traditional mortars in Venice. *Thermochimica Acta*, 269(270):817-828.
- Bakolas A., Biscontin G., Moropoulou A., Zendri E. (1998) Characterization of structural byzantine mortars by thermo-gravimetric analysis. *Thermochimica Acta*, 321 1(2):151-160.
- Barbera G., Barone G., Mazzoleni P., Scandurra A. (2012) Laboratory measurement of ultrasound velocity during accelerated aging tests: Implication for the determination of limestone durability. *Construction and building materials*, 36:977-983.
- Balconi M. (1989) *Le trasformazioni metamorfiche dei silicati*.
- Banchi G., Carla G., Carmela R.G. (1995) *Materiali da Costruzione*. Le Monnier, Firenze.
- Bansa H. (2002) Accelerated aging of paper: Some ideas on its practical benefit. *Restaurator*, 23:106-117.
- Bansa H. (1989) Artificial aging as a predictor of paper's future useful life. *The Abbey Newsletter Monograph Supplement 1*.
- Baraldi P., Baraldi C., Curina R., Tassi L., Zannini P. (2007) A micro-Raman archaeometric approach to Roman wall paintings. *Vib. Spectrosc.* <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2006.04.029>
- Barca S., Melis E., Annino E., Cincotti F. (2009) Note illustrative della carta geologica d'Italia alla scala 1:50000, foglio 557 (Cagliari).
- Barton R., Choubey V. (1977) The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 10(1):1-54.
- Barroccu G., Crespellani T., Loi A. (1981) Caratteristiche geologico-tecniche del sottosuolo dell'area urbana di Cagliari. *Riv. Ital. Geotec.*, 15:98-144.
- Barry, R.G., Charney, R.J. (1983) *Atmosphere, Weather and Climate*, Routledge.
- Beccaluva L. (1985) Geochronology in Sardinia: Results and problems. *Rendiconti della società Italiana di mineralogia e petrologia*, 40(1):57-72.
- Bégin P.L., Kaminska E. (2002) Thermal accelerated ageing test method development. *Restaurator* 23, 89-105.
- Bejor G. (1993) Romanizzazione ed evoluzione dello spazio urbano in una città punica: il caso di Nora. *L'Africa Romana*, 10:843-856.

- Belfiore C.M., Fichera G.V., La Russa M., Pezzino A., Ruffolo F.A., Galli G., Barca D. (2015) a multidisciplinary approach for the archaeometric study of pozzolanic aggregate in roman mortars: the case of villa dei quintili (Rome, Italy). *Archaeometry* 57,(2):269–296.
- Bellotto M., Gualtieri A., Artioli G., Clark S.M. (1995) Kinetic study of the kaolinite-mullite reaction sequence. Part I: kaolinite dehydroxylation. *Phys. Chem. Minerals.*, 22(4):207-214.
- Batterham R., Rai R. (2008) A comparison of artificial ageing with 27 years of natural ageing. AICCM. AICCM Book, Paper and Photographic Materials Symposium.
- Billows E. (1922) *Lessico Mineralogico per l'Isola di Sardegna*. Ledda, Cagliari.
- Bordicchia F., Marini C., Naitza S., Savli D., Tocco S. (2007) Two ancient roman quarries in Cagliari (Italy): survey, mapping and evaluation of the state of conservation. *Cave storiche e risorse lapidee, Restauro Archeologico*, 13:34-38.
- Borghini G. (1992) *Marmi antichi*, Roma.
- Boriani M., Scazzosi L. (1987) *Natura e architettura: la conservazione del patrimonio paesistico*. Clup, Milano.
- Branda F., Luciani G., Costantini A., Piccioli C. (2001) Interpretation of the Thermogravimetric Curves of Ancient Pozzolanic Concretes. *Archaeometry*, 43(4):447-453.
- Brandon C., Hohlfelder R. L., Oleson J. P. (2008) The Concrete Construction of the Roman Harbours of Baiae and Portus Iulius. *Int. Jour. of Naut. Arch.*, 37:374-92.
- Bultrini G., Fragala I., Ingo G.M., Lanza G. (2006) Minerog-petrographic, thermal and microchemical investigation of historical mortars used in Catania (Sicily) during the XVII century A.D. *Appl. Phys. A*, 83:529-536.
- Cagnana A. (2000) *Archeologia dei materiali da costruzione*. SAP Società Archeologica S.r.l., Mantova.
- Cantisani E., Fratini F., Malesani P., Molli G. (2005) Mineralogical and petrophysical characterisation of white Apuan marble. *Period. Mineral.*, 74(2):117-140.
- Canu S., Rosati L., Fiori M., Motroni A., Filigheddu R., Farris E. (2015) Bioclimate map of Sardinia (Italy). *Journal of Maps*, 11(5):711-718.
- Capedri S., Venturelli G. (2004) Accessory minerals as tracers in the provenancing of archaeological marbles, used in combination with isotopic and petrographic data. *Archaeometry*, 46(4):517-536.
- Careddu G., Marras M. (2013) The effects of solar UV radiation on the gloss values of polished stone surfaces. *Construction and Building Materials*, 49:828–834.
- Carmigniani L., Oggiano G., Funedda A., Conti P., Pasci S. (2015) Geological map of Sardinia (Italy) scale 1:250.000.
- Casati P., Pace F. (1996) *Scienze della Terra, volume II - L'atmosfera, l'acqua, i climi, i suoli*. CittàStudi, Milano.
- Casula G., Cherchi A., Montadert L., Murru M., Sarria E. (2001) The Cenozoic graben system of Sardinia

(Italy): geodynamic evolution from new seismic and field data. *Mar Pet Geol.*, 18:863-888.

- Corrotti R., Criscuolo A. (1992) Attività estrattiva di materiale litoide pregiato e implicazioni ambientali nel distretto apuano di Carrara (Toscana). *Mem. Descr. Carta Geologica d'Italia*, Vol. XLII.
- Cherchi A. (1974) Appunti biostratigrafici sul Miocene della Sardegna (Italia). In: *Actes V congrès du Neog. Médit.*, Lyon.
- Cole W., Kroone B. (1960) Carbon dioxide in hydrated portland cement. *American concrete institute Journal*, 31(12):1275-1295.
- Coli M. (1995) Geo-structural and Geo-mechanical setting of the Carrara Marble Quarries. Preprint.
- Collepari M., Coppola L. (2015) Durabilità del calcestruzzo secondo le linee Guida del Ministero LL. PP. Parte V: esposizione ai terreni chimicamente aggressivi.
- Coplen T.B., Brand W.A., Gehre M., Groning M., Meijer H.A.J., Toman B., Verkouteren R.M. (2006) New guidelines for ¹³C measurements. *Anal. Chem.*, 78(7):2439-2441.
- Crisci G.M., Franzini M., Lezzerini M., Mannoni M., Riccardi M.P. (2004) Ancient mortars and their binders. *Per. Mineral*, 73:259-268.
- Critchfield H.J. (1983) *General Climatology*. Prentice-Hall.
- Crobu I. (2003) Le malte delle piccole terme della città punico-romana di Nora (Sardegna centro-meridionale); caratterizzazione petrografica e fisica. Tesi di Laurea triennale. Università degli Studi di Cagliari
- Coroneo R. (1993) *Architettura romanica dalla metà del Mille al primo '300*. Ilisso, Nuoro.
- Columbu S., Marchi M., Martorelli R., Palomba M., Pinna F., Sitzia F., Tanzini L., Viridis A. (2019a) *Architettura romanica e territorio. Indagini archeometriche sulle pietre e i marmi delle chiese della Sardegna in età giudiciale: nuovi approcci per la loro caratterizzazione, valorizzazione e conservazione*. CUEC, Cagliari
- Columbu S., Gioncada A., Lezzerini M., Sitzia F. (2019b) Mineralogical-chemical Alteration and Origin of Ignimbritic Stones Used in the Old Cathedral of Nostra Signora di Castro (Sardinia, Italy). *Studies in conservation*. <http://dx.doi.org/10.1080/00393630.2018.1565016>
- Columbu S., Garau A.M., Lugliè C. (2019c) Geochemical characterisation of pozzolanic obsidian glasses used in the ancient mortars of Nora Roman theatre (Sardinia, Italy): provenance of raw materials and historical–archaeological implications. *Archaeological and Anthropological Sciences* 11:2121–2150
- Columbu S., Lisci C., Sitzia F., Lorenzetti G., Lezzerini M., Pagnotta S., Raneri S., Legnaioli S., Palleschi V., Gallello G., Adembri B. (2018a) Mineralogical, petrographic and physical-mechanical study of Roman construction materials from the Maritime Theatre of Hadrian's Villa (Rome, Italy). *Measurement*, 127:264-276
- Columbu S., Palomba M., Sitzia F., Murgia M. (2018b) Geochemical, mineral-petrographic and physical-mechanical characterization of stones and mortars from the Romanesque Saccargia Basilica (Sardinia, Italy) to determine their origin and alteration. *Ital. J. Geosci.*, 137:00-15.
- Columbu S., Antonelli F., Sitzia F. (2018c) Origin of Roman worked stones from St. Saturno Christian Basilica (south Sardinia, Italy). *Mediterranean Journal of archaeology and archaeometry*, 18(5):17-36.

- Columbu S. (2018) Petrographic and geochemical investigations on the volcanic rocks used in the Punic-Roman archaeological site of Nora (Sardinia, Italy). *Environmental Earth Sciences* (2018) 77:577
- 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 Geosciences*, 136(2):138-262.
- Columbu S., Lisci C., Sitzia F., Buccellato G. (2017) Physical–mechanical consolidation and protection of Miocenic limestone used on Mediterranean historical monuments: the case study of Pietra Cantone (southern Sardinia, Italy) *Environ Earth Sci.*, 76:148.
- Columbu S., Sitzia F., Ennas G. (2016) The ancient pozzolanic mortars and concretes of Heliocaminus baths in Hadrian's Villa (Tivoli, Italy). *Archaeological and Anthropological Sciences*, 8:1-31.
- Columbu S., Sitzia F., Verdiani G. (2015) Contribution of petrophysical analysis and 3D digital survey in the archaeometric investigations of the Emperor Hadrian's Baths (Tivoli, Italy). *Rendiconti lincei*, 26(4):455-474.
- Courtois C. (1989) *Le bâtiment de scène des théâtres d'Italie et de Sicile. Étude chronologique et typologique.* Louvain-la-Neuve.
- Cuccuru F., Fais S., Ligas P. (2014) Dynamic elastic characterization of carbonate rocks used as building materials in the historical city centre of Cagliari (Italy). *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 47(3):259-266.
- Della Torre S. (2010) Preventiva, integrata, programmata: le logiche coevolutive della conservazione. In: Biscontin G. e Driussi G., *Pensare la prevenzione. Manufatti, usi, ambienti: atti del XXVI convegno Scienza e Beni culturali*, Bressanone.
- Del Monte M. (2005) *Il biodegrado dei monumenti in pietra: i licheni e i "segni del tempo".* Antico.
- Del Vais C., Grillo M., Naitza S. (2014) *Le cave di arenaria dell'area di Tharros: risultati preliminari di una ricerca archeologica e archeometrica.* Bononia University Press, Bologna.
- Delogu R. (1954) *L'architettura del Medioevo in Sardegna.* La Libreria dello Stato, Roma.
- Dettoni B., Zanzari R.A., Zuddas P. (1982) *Le acque termali della Sardegna. PFE Sottoprogetto Energia Geotermica. Relazione finale sul tema della ricerca: Studi geologici e geofisici finalizzati alla ricerca di fluidi caldi nel sottosuolo.* A cura di: Istituto di Geopedologia – Geologia applicata Università di Sassari.
- Duchi V., Vinci A. (1981) Mn in rocce carbonatiche: Determinazione del suo contenuto nella frazione carbonatica. *Rendiconti della Società Italiana di Mineralogia e Petrografia*, 36(2):639-649.
- Dunham R.J. (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: *Classification of Carbonate Rocks* (Ed. W.E. Ham), *Am. Assoc. Pet. Geol. Mem.*, 1:108-121.
- Ebert A., Gnos E., Ramseyer K., Spandler C., Fleitmann D., Bitzios D., Decrouez D. (2010) Provenance of marbles from Naxos based on microstructural and geochemical characterization. *Archaeometry*, 52(2): 209-228.
- Fadda A.F. (1994) *Sardegna, guida ai tesori nascosti.* Coedisar, Cagliari.
- Fais S., Cuccuru F., Ligas P., Casula G., Bianchi G.M. (2015) Integrated ultrasonic, laser scanning and petrographical characterisation of carbonate building materials on an architectural structure of a historic building. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 76(1):71-84.

- Favretto L., Moretti G.L. (1992) Sulla presenza di un' illite espandibile nelle argille scagliose provenienti da una perforazione petrolifera dell'appennino emiliano. Laboratori del servizio geochimico Agip Mineraria.
- Finocchi S. (2003) Nora e il territorio: le risorse minerarie, in Nora area C. Scavi 1996-1999, a cura di B.M. Giannattasio, Genova, pp. 31-33.
- Fioretti G., Mazzoleni P., Acquafredda P., Adriani G.F. (2018) On the technical properties of the Carovigno stone from Apulia (Italy): physical characterization and decay effects by means of experimental ageing tests. *Env. Earth Sci.*, 77:17.
- Fioretti G. (2016) Ageing test e analisi di degrado di rocce carbonatiche pugliesi impiegate come pietre ornamentali e da costruzione. PhD thesis. Politecnico di Bari.
- Floris S. (2016) Architettura templare a Tharros – II. Il “Tempio a pianta di tipo semitico” e il “Tempio di Demetra”, *Ocnus* n. 24/2016.
- Folk R.L. (1959) Practical petrographic classification of limestones. *Am Assoc Pet Geol Bull.*, 43:1-38.
- Franzini M., Lezzerini M., Origlia F. (2010) Marbles from the Campiglia Marittima area (Tuscany, Italy). *Eur. J. Mineral.*, 22:881-893.
- Frasca M.H., Yamamoto J.K. (2006) Ageing tests for dimension stone - experimental studies of granitic rocks from Brazil. In: *Proceedings of IAEG 2006*.
- Friedman I., O'Neil J., Cebula G. (1982) Two new carbonate stable isotope standards. *Geostand. Newsl.*, 6 (1):11-12.
- Froment F., Tourniè A., Colomban P. (2008) Raman identification of natural red to yellow pigments: Ochre and iron-containing ores. *Journal of Raman Spectroscopy*, 39(5):560-568.
- Fulvi F. (1996) *Dizionario di geografia fisica*. Newton Compton, Roma.
- Garau A.M. (2005) *Le pietre e le malte del teatro di Nora (Sardegna SW)*. PhD tesi. Università degli Studi di Cagliari.
- Genestar C., Pons C., Màs A. (2006) Analytical characterisation of ancient mortars from the archaeological Roman city of Pollentia (Balearic Islands, Spain). *Analytica Chimica Acta*, 557:373-379.
- Germann K., Gruben G., Knoll H., Valis V., Winkler F.J. (1988) Provenance characteristics of Cycladic (Paros and Naxos) marbles. A multivariate geological approach. In: Hertz, N., Waelkens, M. (Ed), *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade*, NATO ASI series, 153:252-262.
- Giannattasio B.M. (2016) Il quartiere nord-occidentale di Nora tra età severiana e tardo-antico: recenti scavi. In: *Nora antiqua*, a cura di S. Angiolillo, M. Giuman, R. Carboni, E. Cruccas, 83-90.
- Giardina A. (2008) *Roma Antica*. Laterza, Roma, Bari.
- Giuntella A.M. (1987) Note preliminari sulla ceramica c.d. dipinta. *Quaderni della soprintendenza archeologica delle provincie di Cagliari ed Oristano*, 4,2:95-97.
- Ghobadi M.H., Babazadeh R. (2014) Experimental Studies on the Effects of Cyclic Freezing–Thawing, Salt Crystallization, and Thermal Shock on the Physical and Mechanical Characteristics of Selected Sandstones. *Rock Mech Rock Eng.*, 48:1001-1016.

- Grillo S.M., Prochaska W. (2014) The marble inventory of the early christian Basilica San Saturnino/Cagliari-Sardinia). In: Boerner W., Uhlirz S., (Ed) CHNT16 urban archaeology and prospection, Museen der Stadt - Stadtarchaeologie, Wien.
- Grillo S.M. (2009) Il Manuale tematico della pietra. IBS.
- Gutman M., Zanier K., Lux J., Kramar S. (2016). Pigment analysis of roman wall paintings from two villae rusticae in Slovenia. *Mediterr. Archaeol. Archaeom.* <https://doi.org/10.5281/zenodo.160970>.
- Hajilar S. (2015) Nano-Scale Investigation of Mechanical Characteristics of Main Phases of Hydrated Cement Paste. Master Thesis. University of Massachussets Amherst.
- Harlov D., Austrheim H. (2013) *Metasomatism and the chemical transformation of rocks*. Springer, London.
- Ikumi T., Cavalaro H.P.S., Segura I. (2019) The role of porosity in external sulphate attack. *Cement and concrete composites*, 97:1-12.
- Ingo G.M., Fragalà I., Bultrini G., De Caro T., Riccucci C., Chiozzini G. (2004) Thermal and microchemical investigation of Phoenician–Punic mortars used for lining cisterns at Tharros (western Sardinia, Italy). *Thermochimica Acta*, 418(1)53:60.
- Irvine T.N., Baragar W.R.A. (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.*, 8:523-548.
- Isikdag B., Topçu B. (2013) The effect of ground granulated blast-furnace slag on properties of Horasan mortar. *Construction and Building Materials.*, 40:448-454.
- Izzo F., Arizzi A., Cappelletti P., Cultrone G., De Bonis A., Germinario C., Graziano F., Grifa C., Guarino V., Mercurio M., Morra V., Langella A. (2016) The art of building in the Roman period (89 B.C. – 79 A.D.): Mortars, plasters and mosaic floors from ancient Stabiae (Naples, Italy). *Construction and Building Materials.*, 117:129-143.
- Katarzyna J. Stanienda-Pilecki (2018) Magnesium calcite in Muschelkalk limestones of the Polish part of the Germanic Basin. *Carbonates and evaporites* 33, 801,821.
- Kim S.T., O'Neil J.R., Hillaire-Marcel C., Mucci A. (2007) Oxygen isotope fraction between synthetic aragonite and water: Influence of temperature and Mg²⁺ concentration. *Geochim. Cosmochim. Acta* *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71(91):4704-4715.
- Kirova K.T. (1979) *La basilica di S. Saturnino in Cagliari. La sua storia e i suoi restauri*. Minipress, Cagliari.
- Köppen W. (1931) *Grundriß der Klimakunde*, 2^a ed., Berlino-Lipsia, Walter de Gruyter & Co.
- Koralay T. and Kadioglu K.Y. (2008) Reasons of different colors in the ignimbrite lithology: Micro-XRF and confocal Raman spectrometry method. *Spectrochimica Acta Part A*, 69:947-955.
- Lafuente B., Downs R.T., Yang H., Stone N. (2016) The power of databases: The RRUFF project, in: *Highlights in Mineralogical Crystallography*. <https://doi.org/10.1515/9783110417104-003>
- Lapuente M.P. (1995) Mineralogical, petrographical and geochemical characterization of white marbles from Hispania. In: Maniatis Y., Herz N., Basiakos Y. (Ed). *The study of marbles and other stones used in antiquity*, Arche-type publications Maniatis, Ltd., London, pp. 151-160.
- Lay T., Wallace T.C. (1995) *Modern Global Seismology*. Academic Press.

- Lavagnini A., Martorelli S., Coretti C. (1987) Radiazione solare in Italia. Mappe mensili della radiazione globale giornaliera. Roma, CNR, Istituto di Fisica dell'Atmosfera.
- Lazzarini L., Antonelli F. (2003) Petrographic and isotopic characterization of the marble of the island of Tinos (Greece). *Archaeometry*, 45:541-552.
- Lazzarini L., Pensabene P., Turi B. (1999) Isotopic and petrographic characterization of marmor lesbium, island of Lesbos, Greece. *Asmosia*, 5:125-129.
- Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B. (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journ. Petrol.*, 27, 745-750.
- Le Maitre R.W. (1989) A Classification of igneous rocks and glossary of terms. Blackwell, Oxford.
- Leon P. (2008) Costi e benefici del restauro. *Economia della Cultura*. 8(2):157-160.
- Levin Z., Cotton W.R. (2009) Aerosol Pollution Impact on Precipitation. Levin, Zev, Cotton, William R. doi:10.1007/978-1-4020-8690-8. ISBN 978-1-4020-8689-2.
- Lezzerini M. (1996) Studio chimico, mineralogico e petrografico delle malte antiche finalizzato alla loro conservazione ed il loro restauro. PhD thesis. Università degli Studi di Pisa.
- Lisci C. (2014) Physical and chemical analysis of “Pietra Cantone” of Cagliari: Importance of petrography applied to the protection of cultural heritage. Bachelor degree in Geological Sciences, University of Cagliari (Italy).
- Mannoni T., Gianluca P., Vecchiattini R. (2004) Rapporti tra archeologia, archeometria e cultura materiale nello studio dei materiali impiegati nelle opere portuali, In: Rubettino (Ed). *Le strutture dei ponti e degli approdi antichi. Convegno Anciennes Routes Maritimes Méditerranéennes*.
- Marioni N., Pavese A., Foi M., Trombino M. (2005) Characterisation of mortar morphology in thin sections by digital image processing. *Cement and Concrete Research*, 35:1613-1619.
- Martyn D. (1992) *Climates of the world*. Elsevier.
- Massidda L., Atzeni C., Sanna U. (1994) Acquisizione di dati su processi di degrado e interventi di consolidamento alle terme a mare di Nora (Pula, CA). Relazione finale della convenzione/contratto del 18-07-1994 stipulata con la soprintendenza archeologica per le provincie di Cagliari ed Oristano. Università degli studi di Cagliari, Dipartimento di ingegneria chimica e materiali, pp 95.
- Massidda L., Sanna U. (1994) La cristallizzazione salina nei materiali da costruzione. L'esempio del sito archeologico di Nora, Sardegna. Dipartimento di ingegneria chimica e materiali.
- Melis S., Columbu S. (2000) Matériaux de construction en époque romaine et avec les anciennes carrières: l'exemple du théâtre de Nora (Sardaigne SO, Ietalie). In: Lorenz, J., Tardy, D., Coulon, G. (Eds.), *La pierre dans la ville antique et médiévale. Analyse méthodologie et apports*, Argentoun sur Creuse. St.-Marcel: Musée d'Argentomagus (Ed.), pp 103–117.
- Meloni P. (1975) *La Sardegna Romana*. Chiarella, Sassari.
- McComiskey A., Andrews E. (2001) *Aerosols and Radiation - NOAA Earth System Research Laboratory*.
- Middlemost E.A.K. (1989) Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chemical Geology*, 77:19-26.

- Miguel C., Lopes J.A., Clarke M., Melo M.J., (2012) Combining infrared spectroscopy with chemometric analysis for the characterization of proteinaceous binders in medieval paints. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2012.09.003>.
- Milosevic J., Gago A.S., Lopes M., Bento R. (2012) Experimental Tests on Rubble Masonry Specimens – Diagonal Compression, Triplet and Compression Tests. WCEE 15, Lisbon.
- Miriello D., Barca D., Bloise A., Ciarallo A., Crsci G.M., De Rose T., Gattuso C., Gazineo F., La Russa M. (2010) Characterisation of archaeological mortars from Pompeii (Campania, Italy) and identification of construction phases by compositional data analysis. *Journal of Archaeological Science*, 37:2207-2223.
- Molina E., Cultrone G., Sebastian E., Alonso J.F. (2013) Evaluation of stone durability using a combination of ultrasound, mechanical and accelerated aging tests. *Journal of Geophysics and Engineering*, 10:0-18.
- Monte M., Bianchini L. (2006) Formazione di ossalati di calcio su campioni di marmo da parte di funghi, In: Chiari G., Sampò S., Torraca G. (Ed). *Proceedings of: The oxalate films: origin and significance in the conservation of works of arts*. Milano.
- Mora C.F., Kwan A.K.H. (2000) Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing. *Cem. Concr. Res.*, 30(3):351-358.
- Mora C.F., Kwan A.K.H., Chan H.C. (1998) Particle size distribution of coarse aggregate using digital image processing. *Cem. Concr. Res.*, 28(6):921-932.
- Moropoulou A., Bakolas A., Bisbikou K. (2000) Investigation of the technology of historic mortars. *J. Cult. Herit.*, 1:45-58.
- Moropoulou A., Bakolas A., Anagnostopoulou S. (2005) Composite materials in ancient structures. *Cement Concr Compos.*, 27:295-300.
- Moropoulou A., Cakmak A., Labropoulos K.C., Van Grieken R., Torfs K. (2004) Accelerated microstructural evolution of a calcium–silicate–hydrate (C–S–H) phase in pozzolanic plaster using fine siliceous sources: comparison with historic pozzolanic mortars. *Cement and Concrete Research*, 34:1-6.
- Moropoulou A., Bakolas A., Bisbikou K. (1995) Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques. *Thermochim Acta*, 269(270):779-95.
- Mutluturk M., Altindag R., TurK G. (2004) A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing–thawing and heating–cooling. *Rock Mech. Min. Sci.*, 41(2):237-244.
- Navarro R., Catarino R., Pereira D., Gil F.P.S.C. (2019) Effect of UV radiation on chromatic parameters in serpentinites used as dimension stones. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01469-3>.
- Nylander W. (1866) Les lichens du Jardin de Luxembourg. *Bulletin de la Société Botanique de France*, 13:364-372.
- O'Donoghue M. (2006) *Gems*, Sixth edition. Butterworth-Heinemann.
- Oliver R.P., Cennini A., Val d'Elsa C., Thompson D. V. (2006). *Il Libro dell'Arte*. Itailca. <https://doi.org/10.2307/476627>
- Osama M., Hassan A., Fadel M., Hassan L. (2014) Use of ZnO nanoparticles for protecting oil paintings on paper support against dirt, fungal attack, and UV aging. *Journal of Cultural Heritage*, 15(2):165-172.

- Pala A. (1997) Carta idrogeologica di Cagliari. Coedisar, Cagliari.
- Palmstrom A. (1995) RMI-a rock mass characterization system for rock engineering purposes. PhD thesis. University of Oslo (Norway).
- Pavia S., Caro S. (2008) An investigation of Roman mortar technology through the petrographic analysis of archaeological material. *Construction and Building Materials*, 22:1807-1811.
- Pecchioni E., Fratini F., Cantisani E. (2018) *Le malte antiche e moderne tra tradizione ed innovazione*, Patron. Bologna.
- Peixoto J.P., Oort A.H. (1992) *Physics of climate*, American Institute of Physics.
- Pesce G. (1972) *Nora. Guida agli scavi, II edizione*. Cagliari.
- Pinna M. (1978) *L'atmosfera e il clima*. UTET, Torino.
- Piovesan R., Siddall R., Mazzoli C., Nodari L. (2011) The Temple of Venus (Pompeii): A study of the pigments and painting techniques. *J. Archaeol. Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.05.021>.
- Pool B.A. and Sims A. (2016) *Concrete Petrography*. CRC press.
- Previato C. (2016) *Nora. Le cave di pietra della città antica*. Quasar, Roma.
- Rendina C. (2007) *Roma ieri, oggi e domani*. Newton Compton.
- Riccardi M.P., Dominuco P., Tomasi C., Ferloni P. (1998) Thermal, microscopic and X-ray diffraction studies on some ancient mortars. *Thermochimica Acta*, 321:207-214.
- Rosado T., Reis A., Mirao J., Candeias A., Vandenabeele P., Caldeira A.T. (2014) Pink! Why not? On the unusual colour of Evora Cathedral. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 94:121-127.
- Rosenbaum J. and Sheppard S.M.F. (1986) An isotopic study of siderites, dolomites and ankerites at high-temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 50(6):1147-1150.
- Rosso F., Pisello A.N., Jin W., Ghandehari M., Cotana F., Ferrero M. (2016) Cool Marble Building Envelopes: The Effect of Aging on Energy Performance and Aesthetics. *Sustainability* 8(8):753.
- Sağın E.U., Böke H., Aras N., Yalçın Ş. (2012) Determination of CaCO₃ and SiO₂ content in the binders of historic lime mortars. *Mater. Struct. Constr.* <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9802-1>.
- Sansonetti A. (2014) Monitoraggio dello stato di conservazione delle superfici dei beni architettonici. In: *Roma Technology for all 2014 – 5 Giugno 2014*.
- Serra P.B. and Bacco G. (1996) *Africa Romana*. In: Democratica sarda Ed. Atti del XII convegno di studio, 12-15 Dicembre. Olbia.
- Scott Armstrong J. (1982) The Value of Formal Planning for Strategic Decisions. *Strategic Management Journal*, 3:197-211.
- Scrima S. (2014) *Introduzione ai beni culturali*. Ask-y Factory, Parigi.
- Siedel H. (2018) Salt efflorescence as indicator for sources of damaging salts on historic buildings and monuments: a statistical approach. *Environ. Earth Sci.* <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7752-4>.

- Siegfried S., Ruedrich J. (2004) Ultrasonic wave velocities as a diagnostic tool for the quality assessment of marbles. 6.th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Lisbon, Portugal.
- Signorelli S., Peroni C., Camaiti M., Frattini F. (1996) The presence of vaterite in bonding mortars of marble inlays of Florence cathedral. *Mineral. Mag.*, 60,663.
- Silva A.S., Paiva M., Ricardo J., Salta M., Monteiro A.M., Candeias A.E. (2006) Characterisation of roman mortars from the archaeological site of Tróia (Portugal). *Materials Science Forum*, 514-516:1643-1647.
- Sitzia F., Beltarme M., Columbu S., Lisci C., Miguel C., Mirao J., (*in progress*) Archaeometric investigations on renderings, finishing coats mortars and paintings from Forum Traiani Roman Spa (III cent. AD, Sardinia, Italy).
- Solla L., Meloni P., Sanna U., Cargangiu G., Cocco O. (2015) Pigments and materials across Sardinia's walls: contribution on the Tomba dei Pesci e delle Spighe in Cagliari. *Periodico di Mineralogia*, 84(3A):453-464.
- Stepkowska E.T., Perez-Rodriguez J.L., Sayagues M.J., Martinez-blanes J.M. (2003) Calcite, Vaterite and Aragonite forming on cement Hydratation from liquid and gaseous phase. *Jurnal of thermal analysis and calorimetry*, 73:247-269.
- Sterfilinger K. and Pinzari F. (2012) The revenge of time: fungal deterioration of cultural heritage with particular reference to books, paper and parchment. *Environmental Microbiology* 14(3):559-566.
- Strahler A.N. (1993) *Geografia fisica*. Piccin.
- Streckeisen A. (1974) Classification and nomenclature of volcanic rocks. I.U.G.S. (Int. Union Geol. Sci.), Subcomm. on the Systematics of Igneous Rocks. *Inter. Rep. Contrib.*, 70.
- Striani R., Esposito Corcione C., Dell'Anna Muia G., Frigione M. (2016) Durability of a sunlight-curable organic-inorganic hybrid protective coating for porous stones in natural and artificial weathering conditions. *Progress in Organic Coatings*, 101:1-14.
- Strofer E. (1990) Experimental measurement: Interpreting extrapolation and prediction by accelerated aging. *Restaurator*, 11:254-266.
- Tronchetti C. (1984) *Nora*. Sassari.
- Urbani G. (2000) *Intorno al restauro*. Skira, Milano.
- Urosevic M., Sebastián-Pardo E., Cardell E. (2010) Rough and polished travertine building stone decay evaluated by a marine aerosol ageing test. *Construction and Building Materials*, 24:1438-1448.
- Valek J. and Veiga R. (2005) Characterisation of mechanical properties of historic mortars – testing of irregular samples. *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture*, 83:356-373.
- Van Nieuwenburg C.J. Pieters H.A.J. (1929) Studies on hydrated aluminium silicates: I. The rehydration of metakaolin and the synthesis of kaolin. *Recueils des Travaux Chimiques de Pays-Bas*, 48:27-36.
- Vannelli V. (2001) *Guida al Verde di Teulada e del suo territorio*. Cuccu, Cagliari.
- Vardabasso S. (1962) Questioni paleogeografiche relative al Terziario antico della Sardegna. *Mem Soc Geol Ital.*, 3:655-673.

- Veiga, M. R., Magalhães A., Bosiljkov V. (2004) Capillarity tests on Historic mortar samples extracted from site. Methodology and compared results. Proc. 13th International Masonry Conference, Amsterdam.
- Velosa A.L., Veiga M.R. (2006) Development of artificial ageing tests for renders - Application to conservation mortars. In: Tompson G. (ed), Proceeding of 7th International Masonry Conference.
- Vignati E. (2001) Modeling coastal aerosol transport and effects of surf-produced aerosols on processes in the marine atmospheric boundary layer. *Journal of geophysical research*, 106(17):20225-220238.
- Vitruvio M.P. (1992) *De Architectura*, A cura di M. Migotto.
- Vola G., Gotti E., Brandon C., Oleson J.P. Hohlfelder R. (2011) Chemical, mineralogical and petrographic characterization of Roman ancient hydraulic concretes cores from Santa Liberata, Italy, and Caesarea Palaestinae, Israel. *Periodico di Mineralogia*, 80(2):317-338.
- Waldum A.M., ANDA O. (1999) Durability of lime-based mortars in a severe climate. Results from field and artificial ageing tests. In: RILEM Publications S.A.R.L (ed.), proceedings of the International RILEM Workshop 297-306.
- Wentworth C.K. (1922) A scale of grade and class terms for clastic sediments. *J. Geology*, 30:377-392.
- Wetmore M.N., Morgan M.H. (2010) *Vitruvius: The Ten Books on Architecture*. Class. Wkly. <https://doi.org/10.2307/4387224>.
- Wilson R.J.A. (1980) Sardinia and Sicily during the Roman Empire: aspects of the archaeological evidence, *Kokalos XXVI-XXVII*, 81:219-242.
- Yavuz H., Altindag R., Sarac S., Ugur I., Sengun N. (2006) Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze-thaw and thermal shock weathering. *Int. J. Rock. Mech. Min.*, 43:767-75.
- Zara A. (2011) *Evoluzione urbana e nuovo assetto monumentale di Nora in età medio-imperiale romana*, Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Padova.
- Zou X., Uesaka T., Gurnagul G. (1996) Predication of paper permanence by accelerated aging. I Kinetic analysis of the aging process. *Cellulose*, 3:243-267.