

UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA



UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA

Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra (DiBEST)

**Dottorato di Ricerca in Scienze e Ingegneria dell'Ambiente, delle Costruzioni e
dell'Energia (SIACE)**

CICLO XXXI

**UN APPROCCIO MULTIDISCIPLINARE PER LA DIAGNOSTICA DI
HAGIA SOPHIA (ISTANBUL – TURCHIA)**

Settore Scientifico Disciplinare GEO/09

Coordinatore: Prof. Salvatore Critelli



Tutor: Dott. Domenico Miriello



Co-Tutor: Dott.sa Alessandra Pecci



Co-Tutor: Ing. Marco Cappa



Dottorando: Dott. Mirco Taranto



*Alla mia famiglia tutta,
vero punto di riferimento nella mia vita*

INDICE

Introduzione	pag. 1
CAPITOLO 1	
Hagia Sophia: cenni storico-architettonici	pag. 3
1.1 La Chiesa di Hagia Sophia	pag. 3
1.2 La Moschea di Hagia Sophia	pag. 10
1.3 Il Museo di Hagia Sophia	pag. 15
CAPITOLO 2	
Materiali e tecniche	pag. 19
2.1 Campionamento dei laterizi	pag. 19
2.2 I laterizi ed il loro processo produttivo	pag. 28
2.2.1 I laterizi di Hagia Sophia	pag. 31
2.3 Tecniche analitiche per la caratterizzazione dei laterizi	pag. 32
2.3.1 Microscopia ottica a luce polarizzata trasmessa	pag. 32
2.3.2 Diffrazione a raggi X su polveri (XRPD)	pag. 36
2.3.3 Spettrometria a fluorescenza di raggi X (XRF)	pag. 38
2.3.4 Analisi in componenti principali	pag. 40
2.3.5 Analisi discriminante	pag. 42
2.3.6 Analisi termiche	pag. 44
2.3.7 Spettroscopia Raman	pag. 46
2.3.8 Microscopia elettronica a scansione (SEM-EDS)	pag. 48
2.4 Sistemi GIS 3D	pag. 50
CAPITOLO 3	
Risultati delle analisi composizionali	pag. 63

3.1 Analisi macroscopica dei campioni	pag. 63
3.2 Analisi petrografiche in sezione sottile	pag. 65
3.3 Analisi modale	pag. 71
3.4 Analisi diffrattometriche (XRPD)	pag. 72
3.5 Analisi chimiche (XRF)	pag. 73
3.6 Microanalisi SEM-EDS	pag. 74
3.7 Analisi termiche (DSC-TG)	pag. 81
3.8 Analisi Raman	pag. 82
CAPITOLO 4	
Discussione dei dati	pag. 84
4.1 Il sistema GIS 3D per Hagia Sophia	pag. 84
4.1.1 Nuvola di punti Laser Scanner	pag. 85
4.1.2 Realizzazione di un modello 3D basato su prospetti storici	pag. 88
4.1.3 Integrazioni fotografiche da terra e da drone nel sistema GIS	pag. 92
4.2 Interpolazione tridimensionale di dati numerici - l'esempio della temperatura	pag. 97
4.3 I laterizi di Hagia Sophia	pag. 104
4.3.1 Caratteristiche macroscopiche	pag. 104
4.3.1 Caratteristiche geochimiche	pag. 109
4.3.3 Caratteristiche minero-petrografiche	pag. 109
4.3.4 Relazione tra fasi costruttive e composizione dei laterizi	pag. 114
Conclusioni	pag. 127
Bibliografia	pag. 131
Risorse Web	pag. 144
Ringraziamenti	pag. 146

APPENDICE A

Descrizione macro e microscopica dei campioni

pag. 147

APPENDICE B

Diffrattogrammi

pag. 192

APPENDICE C

Termogravigrammi

pag. 222

INTRODUZIONE

Da circa 1500 anni l'edificio di Hagia Sophia domina sull'odierna città di Istanbul e la sua tormentata storia, fatta di incendi, crolli, ricostruzioni e occupazioni, è stata oggetto di numerosi studi.

Il presente lavoro rientra in un progetto, avviato nel 2010, tra l'Università Nazionale Autonoma del Messico (UNAM), il Museo di Hagia Sophia di Istanbul e il Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra (DiBEST) dell'Università della Calabria; con lo scopo di realizzare un database GIS3D utile alla diagnostica, finalizzata alla conservazione e restauro, di Hagia Sophia.

Il sistema GIS predisposto ha come punto di partenza un modello tridimensionale geolocalizzato della struttura. L'obiettivo del presente lavoro è quello di implementare ulteriormente tale piattaforma, integrandola con nuovi dati fisici e diagnostici di tipo numerico derivanti da differenti tecniche di analisi, ricavati dallo studio compositivo dei laterizi, migliorandone, nel contempo, le capacità di analisi ed elaborazione nelle tre dimensioni.

Il sistema tridimensionale di partenza è stato implementato con un nuovo modello, basato sulle tavole realizzate da Robert L. Van Nice tra il 1937 ed il 1965, ottenendo una nuova chiave di lettura di questa opera, che viene ancora considerata come uno dei punti di partenza per comprendere al meglio questa complessa struttura e dare alla comunità scientifica un innovativo supporto su cui poter effettuare ulteriori studi.

Gli attuali sistemi GIS sfruttano la rappresentazione geolocalizzata su un piano bidimensionale dei dati disponibili per ottenere risultati statistici di rilievo, permettendo di interpolare dati non ancora informatizzati o ottenuti con strumentazioni di nuova generazione.

Durante il presente lavoro si è cercato di implementare un sistema GIS che abbia come unità relativa di rappresentazione la terza dimensione; basato su modelli tridimensionali di un corpo per i quali si abbiano a disposizione tutte le informazioni in tutti i suoi punti, siano essi dati reali o interpolati.

L'integrazione dei dati spaziali avviene normalmente attraverso una rappresentazione cartografica che da una parte consente di mostrare graficamente un generico tematismo, dall'altra permette di rilevare graficamente la distribuzione di valori nello spazio o la variazione di incidenza tra due o più fattori.

La struttura di Hagia Sophia è oggetto di forti escursioni termiche nei vari periodi dell'anno ed in alcuni particolari orari del giorno e della notte, per tale motivo, proprio per consentire di testare il funzionamento dell'interpolazione di dati nelle tre dimensioni, si è deciso di simulare la distribuzione della temperatura al suo interno e testare il modello predisposto sulla distribuzione della temperatura. Proprio la distribuzione della temperatura, infatti, potrebbe consentire nuove chiavi di lettura, divenendo nel contempo un nuovo strumento di visualizzazione ed analisi diagnostica a disposizione della comunità scientifica.

I dati numerici derivanti da differenti tecniche di analisi, opportunamente normalizzati, disponibili su Hagia Sophia, sono stati ulteriormente integrati con i nuovi dati composizionali derivanti dallo studio di 29 campioni di laterizi, analizzati mediante differenti tecniche diagnostiche. Attraverso la caratterizzazione dei laterizi si è cercato, inoltre, di formulare ipotesi sulla provenienza delle materie prime utilizzate nella loro produzione, mentre tramite analisi statistiche multivariate sono state valutate le possibili correlazioni tra i gruppi geochimici identificati e le fasi costruttive di Hagia Sophia.

Il presente studio propone, dunque, una metodologia innovativa, capace di integrare dati numerici, in un'unica piattaforma software, così da delineare uno standard internazionale per analisi di supporto alla diagnostica dei Beni Culturali e fornire nel contempo, ai tecnici ed al personale di Hagia Sophia, uno strumento di primaria importanza per pianificare e monitorare interventi diagnostici e di restauro.

CAPITOLO 1

HAGIA SOPHIA: CENNI STORICO-ARCHITETTONICI

1.1 La Chiesa di Hagia Sophia

” Gloria a Dio che mi ha concesso l’alto onore di portare a compimento un’opera così grande! O Salomone, ti ho superato!” Secondo lo storico inglese Edward Gibbon (Gibbon, 1872), furono queste le parole che l’Imperatore Giustiniano pronunciò durante la consacrazione della chiesa di Hagia Sophia il 27 dicembre 537.

Le parole che lo storico inglese mette in bocca a Giustiniano riassumono al meglio l’importanza e la magnificenza di questo monumento che da quasi 1500 anni troneggia sul promontorio del Serraglio dell’allora città di Bisanzio (divenuta successivamente Costantinopoli ed infine l’odierna Istanbul) stretta dall’insenatura nota come il “Corno D’Oro” ed il Mar di Marmara (Fig. 1.1).

La città fu eretta in un luogo che è stato a lungo un punto chiave della geografia mondiale, lo stretto che collega il Mar Nero ed il Mar di Marmara, collegato a sua volta con il Mar Mediterraneo, una piccola penisola accerchiata dal mare.



Fig. 1.1 Mappa storica di Costantinopoli [Shepherd, 1911].

Il primo gruppo di coloni si stabilì di fronte al promontorio del Serraglio, sulla sponda asiatica del Bosforo, fondando la colonia di Calcedonia. La leggenda narra che un secondo gruppo di coloni nel 658 a.C., sotto la guida di Bizante, volle consultare l'oracolo di Delfi a proposito del luogo in cui insediarsi. L'oracolo consigliò di fermarsi "di fronte alla terra dei ciechi". Bizante interpretò la frase come un invito a insediarsi di fronte a Calcedonia, poiché i primi coloni, nella loro "cecità" avevano preferito una baia battuta dai venti ed avevano ignorato il promontorio di fronte che offriva un'insenatura naturale per ricoverare le navi durante le tempeste. Qui venne costruita la città di Bisanzio.

Nel 324 l'imperatore Costantino il Grande si stabilì a Bisanzio per edificare la nuova capitale dell'Impero Romano d'Oriente. La nuova capitale, che aspirava a

diventare una nuova Roma, era quattro volte più grande di quella precedente e, dopo esser stata fortificata da nuove mura, venne battezzata Costantinopoli (Kinross, 1974).

L'Imperatore ampliò ed abbellì la città per renderla degna di diventare a pieno titolo la nuova capitale dell'impero. Vennero avviate una serie di nuove edificazioni, principalmente a carattere religioso, come basiliche e nuovi templi pagani.

La città, nuovo punto di riferimento dell'Impero d'Oriente, aprì le porte alla tolleranza religiosa ed al nuovo culto cristiano, che riscuoteva ampi consensi in Oriente. Grazie alla sua politica di accondiscendenza, Costantino fu venerato come uno degli apostoli e considerato un secondo vicario di Cristo in terra. Il culto pagano continuò però a vivere a fianco di quello cristiano (Limberis, 2002).

Nel 325 Costantino inviò in pellegrinaggio in Terrasanta la madre Elena (divenuta poi Sant'Elena), la quale, secondo il vescovo e scrittore greco Eusebio di Cesarea (Franco, 2013) partecipò agli scavi nell'area del Calvario e trovò alcune reliquie della passione di Cristo che spedì a Costantinopoli. Grazie alle reliquie la città ottenne una fama senza precedenti nella storia della cristianità, divenendone così il fulcro politico e spirituale dell'impero. Divenne quindi necessaria la presenza di una chiesa importante e l'Imperatore decise di costruire quella che divenne poi Hagia Sophia. La prima chiesa, voluta da Costantino, ma ultimata dal figlio Costanzo II, venne consacrata nel 360. Si trattava di una basilica in pietra di media grandezza dal tetto trabeato, una navata principale e quattro minori.

Nel 404 la chiesa di Hagia Sophia venne distrutta a seguito di un incendio, che probabilmente seguì l'arresto e l'esilio del patriarca di Costantinopoli, San Giovanni Cristodomo, che nelle sue prediche aveva evidenziato il vizio ed il degrado della corte imperiale (Kinross, 1974). La chiesa venne ricostruita dall'architetto Rufino per volere dell'imperatore Teodosio II e inaugurata nel 415; ma, nel 532, venne nuovamente bruciata a seguito della rivolta di Nika (dal termine greco *nika*, cioè *vinci*) che infuriò nella città provocando numerosi incendi e saccheggi. La rivolta aveva l'obiettivo di deporre l'imperatore Giustiniano il Grande, che era ancora ai suoi primi anni di regno. La rivolta venne domata e l'imperatore volle edificare una chiesa ancora più maestosa della precedente.

Ai lavori di ricostruzione parteciparono maestranze provenienti da tutto l'impero sotto la guida dei due architetti, Antemio di Tralle ed Isidoro di Mileto, anche se lo stesso Giustiniano sovrintendeva regolarmente ai lavori di costruzione (Procopio, 1961). Grazie alle ricchezze confiscate dall'imperatore alle persone implicate nella rivolta di Nika, la costruzione della chiesa poté essere finanziata senza badare a spese.

Per la prima volta e ad una simile scala venne costruita una chiesa con una cupola impostata su base quadrata e poggiante sulla sommità di quattro archi sostenuti da quattro pilastri e completata agli angoli da quattro pennacchi triangolari (Kinross, 1974; Mainstone, 2009).

L'edificio mostra una pianta rettangolare, con un impianto quadrato centrale su cui poggia la cupola (Fig. 1.2). Le dimensioni del rettangolo sono all'incirca 71 x 77 m, esso è suddiviso in tre navate da arcate divisorie in doppio ordine e mostra un unico abside centrale. I quattro archi della navata superano i venti metri di altezza, mentre la cupola che vi poggia sopra arriva ad una altezza da terra di 55.6 m (Erdik & Croci, 2010) ed un diametro di circa 31 m.

All'interno della struttura di Hagia Sophia si possono contare 104 colonne, di cui 40 nelle navate e 64 nel triforio. Molte sono di reimpiego e provengono da strutture più antiche. Sembra che i marmi utilizzati per le colonne provengano da diverse località dell'Asia, dell'Africa e dell'Europa: marmo verde di Karystos, marmo rosa dalla Frigia, rosso Syinitis dall'Egitto, marmo verde dalla Laconia, buff lassikos dalla Karia, marmo bianco-giallastro dalla Lidia, marmo dorato dalla Libia, il Melan Keltic, il marmo color miele, il marmo verde dalla Tessaglia, il marmo bianco di Prokonisos e il marmo di colore grigio di Vosporos (Moropoulou et al., 1970). In realtà, ad una analisi macroscopica più approfondita i lapidei osservati sembrano molti di più (per esempio sembrerebbe ci sia la presenza del porfido rosso antico "lapis porphyrites"); in ogni caso lo studio dei lapidei naturali di Hagia Sophia non rientra negli scopi del presente lavoro. L'estrema disomogeneità dei materiali, legata anche alle loro diverse provenienze, creava una scarsa uniformità tra le colonne, sia in termini di altezza che di diametro. Per rendere omogenei i colonnati, fu usato come espediente l'uso di basi e capitelli di varia forma e misura finemente lavorati che catturavano l'attenzione degli osservatori tanto da far sembrare uguali delle colonne difformi (Kinross, 1974).

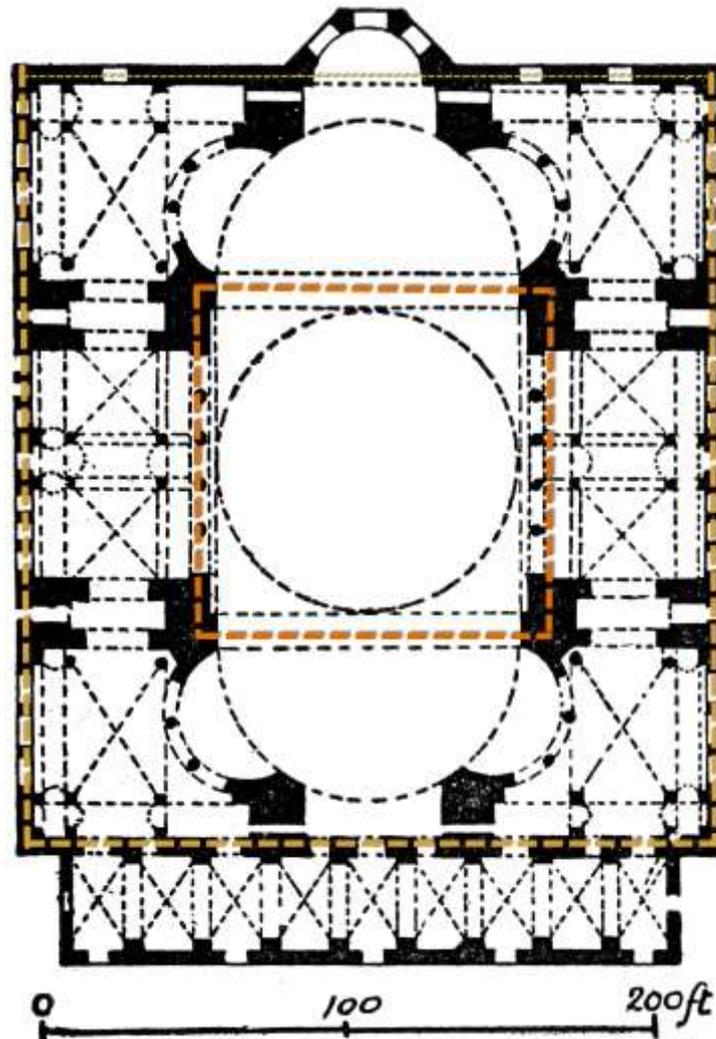


Fig. 1.2 Pianta di Hagia Sophia [Hamlin, 1915;
http://etc.usf.edu/clipart/58200/58277/58277_hagia_plan.htm].

Al centro della navata centrale, nel pavimento, è presente una particolare lastra di marmo che merita un approfondimento: si tratta di un disco di marmo nero che viene definito *omphalion* (o ombelico del mondo). In questo luogo pare venisse posto il trono durante la cerimonia di incoronazione dell'imperatore (Cohen, 2015).

L'assetto strutturale interno della chiesa si reggeva su quattro grandi pilastri principali e quattro pilastri secondari più piccoli, che insieme reggevano tutto il peso degli archi e della grande cupola. I pilastri pare fossero costituiti da materiale roccioso (riconducibile ad una roccia vulcanica porosa), accuratamente selezionato ed incastrato,

rivestito esternamente da marmo. Il legante utilizzato per cementare i pilastri pare fosse del piombo fuso, il quale veniva colato negli stampi fino a raggiungere tutti gli interstizi e a cementarli. È la prima volta in cui è attestato l'uso di un materiale "cementante" basato su una lega metallica e non una normale malta. Il resto della chiesa venne invece edificato utilizzando malta e laterizi (Kinross, 1974). Purtroppo, allo stato attuale, tali pilastri risultano ricoperti da elementi lapidei e non è più possibile determinare con accuratezza la tipologia dei materiali lapidei utilizzati per la loro costruzione.

I progettisti di Hagia Sophia si cimentarono per la prima volta in quell'epoca, nella costruzione di una struttura così grande e complessa, in cui per ogni stadio della costruzione venivano effettuate una serie di sperimentazioni.

La stessa costruzione in laterizi aveva molti problemi di stabilità per l'enorme peso della cupola di forma ribassata, che produceva una grande spinta laterale. Infatti, la spinta esercitata dalla cupola induceva la deformazione della struttura rispetto alla perpendicolarità della superficie originaria, generando un fenomeno di "spanciamento" (Mainstone, 2009). La soluzione trovata da Antemio di Tralle ed Isidoro di Mileto è rappresentata dall'inserimento di una lunga serie di mezze cupole, contrafforti e rinforzi per poter controbilanciare le spinte esercitate dalla cupola. Tuttavia, questa scelta determinò degli squilibri strutturali che furono evidenti, quando nel 558 l'arco e la semicupola orientale collassarono insieme ad una porzione della cupola principale, distruggendo l'altare interno (Kinross, 1974).

I lavori di ricostruzione cominciarono immediatamente per volontà dell'imperatore. Essendo morti i progettisti originari, venne incaricato Isidoro il Giovane, nipote del precedente Isidoro. La causa del crollo venne attribuita principalmente alla forma troppo ribassata della cupola, quindi la nuova cupola venne realizzata aumentandone l'altezza in modo da distribuire meglio le enormi sollecitazioni sulla muratura (riducendo quindi quelli di trazione sul tamburo ed aumentando quelli di compressione sulla cupola). Vennero anche realizzati dei contrafforti e si procedette a rinforzare gli elementi strutturali danneggiati.

Nel 563 i lavori terminarono e la chiesa, una volta inaugurata, poté rimpadronirsi del suo ruolo di centro della cristianità bizantina, tanto da ritenere che alcune sue strutture fossero capaci di lenire malattie (Majeska, 1973; Muller, 1952) (Fig. 1.3).

Secondo la tradizione, lo stesso imperatore Giustiniano il Grande fu afflitto da un terribile mal di testa e nessuno dei medici riuscì a dargli sollievo; mentre errava per la chiesa appoggiò per caso la fronte sulla superficie umida di una colonna e fu guarito in pochi istanti (Yücel et al., 1984).



Fig. 1.3 Colonna che Trasuda o di Gregorio il Taumaturgo [immagine da sito internet dell'attuale museo di Hagia Sophia <http://ayasofyamuzesi.gov.tr/en/int-wishing-column>, 2017].

La chiesa continuò ad essere utilizzata per secoli. Agli inizi del 1200 l'esercito cristiano che partecipava alla quarta crociata, sotto la guida della repubblica di Venezia, venne dirottato dalla Terrasanta sulla città di Costantinopoli, che fu saccheggiata perché considerata anch'essa "città santa" meta di pellegrinaggi e quindi da liberare (Gibbon, 1872). A testimonianza di questo avvenimento, a Venezia si trovano ancora numerose opere provenienti da Costantinopoli e da Hagia Sofia.

La struttura soffrì le conseguenze di eventi sismici nel periodo che va dal VII al XI secolo, durante il quale furono registrate ventitré importanti scosse di terremoto (Kinross, 1974), ognuna delle quali lasciò dei segni nella struttura della chiesa.

I crociati, esperti nelle costruzioni, realizzarono diversi interventi per assicurare la stabilità dell'imponente struttura, concentrandosi principalmente nella realizzazione di contrafforti per sostenere la facciata occidentale della chiesa (Gregorae, 1562).

Il violento terremoto che colpì quest'area nel 1344 causò un pericoloso cedimento che determinò il crollo dell'arcata orientale della chiesa e della parte di cupola connessa. Fece seguito un lungo intervento (l'ultimo ad opera di cristiani) durato quasi 10 anni che consentì alla struttura di raggiungere l'attuale grado di stabilità.

1.2 La Moschea di Hagia Sophia

Il 1452 segna l'ascesa al trono dell'impero Ottomano del sultano Maometto II, che ambiva ad unire Costantinopoli al suo Impero, unione che nessuno dei suoi predecessori era riuscito a costruire. Grazie ad un attacco alla città distribuito sia via terra che via mare (Fig. 1.4), coadiuvato da un reparto specializzato di militari chiamati giannizzeri e grazie all'uso, per la prima volta, di armi basate sulla polvere da sparo, il sultano Maometto II riuscì a prendere la città.

Durante il saccheggio conseguente alla conquista, numerose furono le opere depredate o distrutte nella chiesa che fu consacrata al culto musulmano. In segno di rispetto per il sultano, il suo nome fu trasformato in forma islamica, divenendo la moschea di Ayasofia (Crowley, 2009). I mosaici raffiguranti figure umane vennero coperti e/o cancellati, tuttavia ad alcuni di loro venne risparmiata tale sorte o per la loro posizione decentrata rispetto alla sala dove si celebravano le funzioni religiose, oppure per la difficoltà a raggiungerli.

Sostituita la grande croce sulla cupola con una mezzaluna, furono rimosse le immagini riconducibili al rito cristiano e vennero aggiunti un pulpito ed un *mihrab* (nicchia musulmana per la preghiera). L'ultima opera per completare la trasformazione fu la costruzione di un minareto all'angolo sud-orientale. Da quel momento la città, che cominciò a chiamarsi Istanbul, fu chiamata a pregare non più al suono delle campane ma al grido del *muezzin* (persona incaricata di chiamare i fedeli islamici alle cinque preghiere giornaliere, tramite un apposito canto).



Fig. 1.4 Rappresentazione dell'Assedio di Costantinopoli [Harris, 2013].

Nel secolo successivo vennero completati altri 3 minareti agli altri angoli della nuova moschea, che le diedero l'attuale aspetto. Probabilmente i minareti e le loro solide basi aiutarono anche a stabilizzare la struttura (Kinross, 1974).

Il nuovo sovrano iniziò la costruzione di una serie di moschee in tutta la città, e "Hagia Sophia" divenne il prototipo per la costruzione di nuovi edifici votati al culto musulmano dotati di cupole.

Il trascorrere degli anni e la costruzione di alcuni edifici nei pressi della moschea aveva indebolito la già precaria stabilità della struttura e nel 1573 iniziarono una serie di interventi di ristrutturazione ad opera del famoso architetto Sinan, incaricato dal sultano in persona di sovrintendere al restauro di cui necessitava la grande moschea.

L'operazione venne compiuta abbattendo gli edifici superflui nei dintorni della moschea ed erigendo, con i materiali risultanti dalla distruzione, dei contrafforti che stabilizzarono e dettero solidità alla struttura (Kinross, 1974). Vennero inoltre apportate altre migliorie sia all'interno che all'esterno della moschea.

Sempre ad opera dell'architetto Sinan vennero edificate altre strutture, visibili ancora oggi, come le tombe ottomane a base ottagonale posizionate nell'angolo Sud-Est della moschea, nelle quali riposano le spoglie dei tre sultani Maometto II, Selim II e

Murad III e delle loro famiglie. All'esterno della moschea sorsero scuole di teologia, ospizi e strutture per il clero musulmano, ubicate nell'angolo nord-est della moschea e visibili ancora oggi. Hagia Sophia divenne il nuovo fulcro della religione musulmana dell'epoca, tanto da vietarne l'ingresso a tutti i cristiani, poiché si riteneva che potessero contaminare la spiritualità del luogo (Dankoff, 2004). Pare che i volti dei cherubini, posizionati sui quattro pennacchi della cupola ed i mosaici dei tympana furono coperti solo nel XVI secolo, durante i restauri di Sinan (Dankoff, 2004).

Tra il XVII ed il XIX secolo l'architettura di Hagia Sophia richiamò numerosi studiosi ed esperti di architettura da molte nazioni straniere, che documentarono, a volte anche in modo egregio, l'evoluzione e la trasformazione dell'interno e dell'esterno della moschea (Fig. 1.5).



Fig. 1.5 Interno di Hagia Sophia del 1700 [<https://www.pallasweb.com/p/hagiasophiadraw2.jpg>].

Intorno alla metà del 1800 la moschea si trovava in una forte condizione di trascuratezza, tanto che le tessere d'oro del soffitto si staccavano e capitava di frequente di imbattersene sul pavimento della moschea (Walsh, 2018). Seppur una serie di scosse sismiche nella seconda metà del 1700 danneggiò leggermente l'edificio, il degrado in cui versava la moschea era da attribuire più ad incuria che a fenomeni naturali.

Fortunatamente un nuovo periodo di ripresa edilizia era alle porte. Nel 1839 venne proclamato l'editto denominato "Hatt-i Serif of Gulhane", volto ad annullare ogni discriminazione di culto, razza e nazionalità. L'editto mirava a modernizzare sia militarmente che socialmente l'impero stesso e permettere ad Istanbul di competere con le grandi potenze europee. Ne derivò un notevole afflusso di europei e vennero intraprese numerose opere edilizie ad opera di costruttori e progettisti stranieri (Roudometof, 1964).

In particolare due architetti svizzeri, i fratelli Gaspare e Giuseppe Fossati, vennero notati dal sultano Abdul Mejid, per il quale progettarono e realizzarono una serie di opere. Il loro buon esito fece decidere al sultano di affidare ai fratelli Fossati un nuovo e impegnativo incarico, il restauro della moschea di Hagia Sophia (Mainstone, 1999).

La struttura si trovava in una situazione di quasi abbandono, perché negli ultimi anni non si era provveduto nemmeno all'ordinaria manutenzione, tanto che pioggia e vento filtravano da alcune cupole ed un gran numero di volatili erano annidati negli ampi spazi della moschea (Kinross, 1974).

Nel periodo che va dal 1847 al 1849 i fratelli Fossati strutturarono i lavori sulla moschea in 3 fasi successive: consolidamento, ristrutturazione e realizzazione di nuove opere di sostegno. Una delle opere più importanti del consolidamento fu il "raddrizzamento" delle molte colonne presenti nella moschea che pendevano rispetto alla loro posizione originaria (Underwood & Hawkins, 1961). Le colonne maggiormente inclinate erano quelle delle esedre, l'inclinazione era probabilmente attribuibile alle spinte esercitate dai possenti archi laterali che sostenevano la cupola (Kinross, 1974).

Per rafforzare la cupola vennero usate delle catene di ferro alla base della cupola e del basamento quadrato sul quale poggiava, che vennero nascoste con una cornice. Inoltre vennero riparati i tetti in piombo e furono rimossi i detriti di precedenti restauri. (Hoffmann, 1999). Il restauro dei marmi della moschea fu realizzato sfruttando materiale derivante da precedenti lavori e/o restauri, oppure usando pitture per richiamare le tonalità dei marmi originali.

Durante il restauro dei mosaici fu necessario affrontare la problematica derivante dalla presenza di figure umane nella moschea: la maggior parte dei mosaici raffigurava

figure di divinità o sovrani dell'epoca cristiana, proibiti nel rito musulmano. All'epoca del restauro dei Fossati i tempi non erano maturi per portare alla luce i mosaici di Hagia Sophia. Per evitare possibili ripercussioni sui mosaici ad opera di fedeli musulmani, gli stessi furono portati alla luce solo per riprodurli su schizzi (Fig. 1.6) e poi furono nuovamente ricoperti. Si tentò di ricoprire i mosaici usando pitture o intonaci facilmente rimuovibili in modo da agevolarne la rimozione quando il contesto storico fosse cambiato (Fossati, 1890).



Fig. 1.6 Schizzo dei Fossati sul mosaico che riprende l'imperatore Alessandro [Underwood & Hawkins, 1961].

Il restauro dei Fossati venne completato nel giro di un paio di anni e la nuova moschea venne inaugurata nel 1849. Tra le modifiche apportate durante il restauro vennero appesi ai pilastri della navata centrale otto medaglioni in pelle di cammello raffiguranti i nomi di Allah e dei Profeti (Boriani, 2007) di circa sette metri e mezzo di diametro (Fig. 1.7).



Fig. 1.7 Immagine di Hagia Sofia in cui viene evidenziata la presenza dei dischi recanti i nomi dei profeti [<http://ayasofyamuzesi.gov.tr/en/int-interior>].

1.3 Il Museo di Hagia Sophia

L'impero Ottomano resisteva ancora come figura ma il suo declino sembrava ormai inarrestabile, indebolito da piccole guerre nei Balcani e soprattutto dalla prima guerra mondiale che la vide di fianco all'impero Austro-Ungarico. La sconfitta nella grande guerra comportò l'occupazione dell'impero da parte delle forze alleate europee e la sottomissione del sultano Maometto VI, creando i presupposti per una rivoluzione all'interno della nazione che ebbe luogo sotto la guida di Mustafa Kemal, fondatore del movimento nazionale turco (Atatürk & Akşit, 1998).

Nella conferenza di Losanna nel 1923 (Atatürk & Akşit, 1998) fu proclamata la nazione Turca con sede nella città di Angora, che da quel giorno prese il nome di Ankara.

Mustafa Kemal conosciuto come Atatürk o "padre dei turchi", iniziò una rivoluzione culturale, che vide tra l'altro la trasformazione dell'allora Moschea di Hagia Sophia. Il grande tempio, che aveva servito per mille e quattrocento anni sia la cristianità che l'Islam, divenne infatti un simbolo di fusione tra le civiltà dell'Occidente e dell'Oriente ed il 1° febbraio 1935 fu trasformata da Atatürk in un museo bizantino ottomano (Rossi, 1938).

Dopo aver rimosso i tappeti e portato alla luce i marmi, iniziò il lungo e lento lavoro volto a portare alla luce i mosaici coperti, che il presidente Atatürk riteneva patrimonio

dell'arte cristiana che doveva essere mostrato al mondo senza nessuna proibizione. L'incarico venne affidato all'Istituto Bizantino Americano di Istanbul ed all'Istituto Centrale del Restauro di Roma (Guidobaldi & Barsanti, 2009) ed in particolare a Thomas Whittemore, il quale realizzò un'apposita impalcatura mobile per poter eliminare le pitture e gli intonaci applicati dai Fossati. L'imbiancatura dei mosaici fu rimossa non usando solventi ma meccanicamente, con dei piccoli scalpelli in acciaio (Whittemore, 1938). La rimozione dell'intonaco senza intaccare il mosaico sottostante richiese un intervento certosino che durò fin dopo la seconda guerra mondiale. Il tempo e la qualità delle maestranze permisero alla squadra dell'Istituto Bizantino Americano di effettuare un intervento che restituì l'aspetto originale dei mosaici. Lo studio effettuato da Whittemore su alcuni mosaici evidenziò una particolare inclinazione delle tessere verso l'interno, che l'autore attribuì ad un espediente ottico usato per riflettere meglio la luminosità, tanto da dare alla struttura il nome di "tempio di luce", attribuitogli da Procopio di Cesarea quasi 1500 anni prima (Cesaretti & Fobelli, 2011).

Alla scomparsa di Whittemore i lavori di restauro proseguirono con il suo successore Paul A. Underwood e permisero di riportare alla luce altri capolavori di Hagia Sophia, anche se l'opera di restauro è ancora oggi lontana dall'essere completata.

L'apertura all'occidente voluta da Atatürk permise a Hagia Sophia di ricevere non solo numerosi visitatori e pellegrini, ma anche studiosi da tutto il mondo, affascinati da questa struttura millenaria e dalla sua storia.

Di particolare rilevanza è il lavoro di William Emerson (Emerson & Van Nice, 1950) e Robert L. Van Nice (Van Nice, 1965), i quali realizzarono un'importante ricostruzione grafica di tutto l'edificio, in una serie di 46 tavole (Fig. 1.8) che rappresentano delle dettagliatissime sezioni planimetriche da diverse angolazioni di Hagia Sophia, e le ricostruzioni di diversi elementi architettonici (cupole, scale, cornici, navate, ecc.). Grazie al dettaglio e alla precisione del lavoro, queste ricostruzioni vengono ancora oggi utilizzate per lo studio della struttura.



Fig. 1.8 Tavola n. 30 delle 46 realizzate da Van Nice, sezione trasversale vista da EST, Galleria Superiore e Cupola [Van Nice, 1965].

Per quanto riguarda la storia sulla costruzione evolutiva dal punto di vista architettonico, è particolarmente importante lo studio realizzato da Rowland J. Mainstone, pubblicato nel suo libro “Santa Sofia” (Mainstone, 2009). Qui vengono riportati particolari della costruzione dell’edificio, scoperti grazie a distacchi dei rivestimenti ed in parte grazie ad un prolungato programma di studio e conservazione dei mosaici della cupola. Mainstone, fu anche tra i primi ad effettuare indagini sulla struttura con strumentazione scientifica, per registrare ad esempio, le reazioni di Hagia Sophia alle scosse sismiche.

Tali studi vennero ripresi da Antonia Moropoulou et al. (Moropoulou et al., 1970, 1998, 2000a, 2000b, 2002a, 2002b, 2003, 2006, 2012a, 2012b, 2013; Moropoulou & Polikreti, 2010) che approfondirono gli studi di Mainstone sulla risposta sismica del museo di Hagia Sophia utilizzando nuove tecniche di analisi.

Agli inizi del 2010 a seguito di un progetto avviato tra l’Università del Messico (UNAM), Il museo di Hagia Sophia e l’Università della Calabria (UNICAL), vennero effettuati diversi studi sull’edificio, al fine di realizzare un database GIS 3D per un

approccio multidisciplinare alla diagnostica, finalizzata alla conservazione e restauro, di Hagia Sophia.

La realizzazione del database è stato oggetto di studio di una tesi della scuola di dottorato “Archimede” del Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra (DiBEST) dell’Università della Calabria (Cura, 2016).

Nell’ambito di questo progetto internazionale sono stati effettuati e pubblicati diversi studi che hanno permesso di chiarire alcuni aspetti della storia costruttiva del manufatto. In particolare, è stata realizzata un’indagine termografica all’interno del monumento, rivolta ad individuare l’esatta posizione di alcuni interventi di ricostruzione/restauro e la variabilità dei materiali impiegati, consentendo una migliore comprensione della storia costruttiva del monumento (Cappa et al., 2016); è stata eseguita la caratterizzazione composizionale di alcune malte prelevate dall’edificio (Miriello et al., 2017) ed è stato effettuato uno studio georadar sulla navata centrale per indagare la presenza e la posizione di eventuali paramenti murari al di sotto della navata centrale, utile anche per meglio comprendere le ragioni delle deformazioni della struttura (Barba et al., 2018).

Il presente studio nasce come continuazione del progetto internazionale ed è volto a creare un sistema GIS3D in grado di implementare ed interpolare nelle tre dimensioni, dati numerici derivanti da differenti tecniche di analisi, opportunamente normalizzati, raccolti e/o disponibili sulla struttura di Hagia Sophia.

CAPITOLO 2

MATERIALI E TECNICHE

2.1 Campionamento dei laterizi

Il campionamento dei laterizi di Hagia Sophia è stato effettuato nel 2014 nell'ambito di un precedente progetto di collaborazione avviato tra l'Università del Messico, il Museo di Hagia Sophia di Istanbul e il Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra (DiBEST) dell'Unical.

Trattandosi di un bene storico di elevata rilevanza culturale, è stato accordato agli operatori un campionamento in particolari aree autorizzate, identificabili principalmente con porzioni oggetto di lavori di restauro (Fig. 2.1).



Fig. 2.1. Attività di campionamento dei laterizi di Hagia Sophia. Prelievo del campione BAS2.

Tali aree sarebbero state ricoperte alla fine dei lavori, quindi non vi erano rischi di alterare il manufatto da un punto di vista estetico e di consistenza materica. In particolare, sono stati prelevati 29 frammenti di laterizio, le cui immagini

macroscopiche acquisite mediante scanner piano in luce riflessa sono riportate in Fig. 2.2.

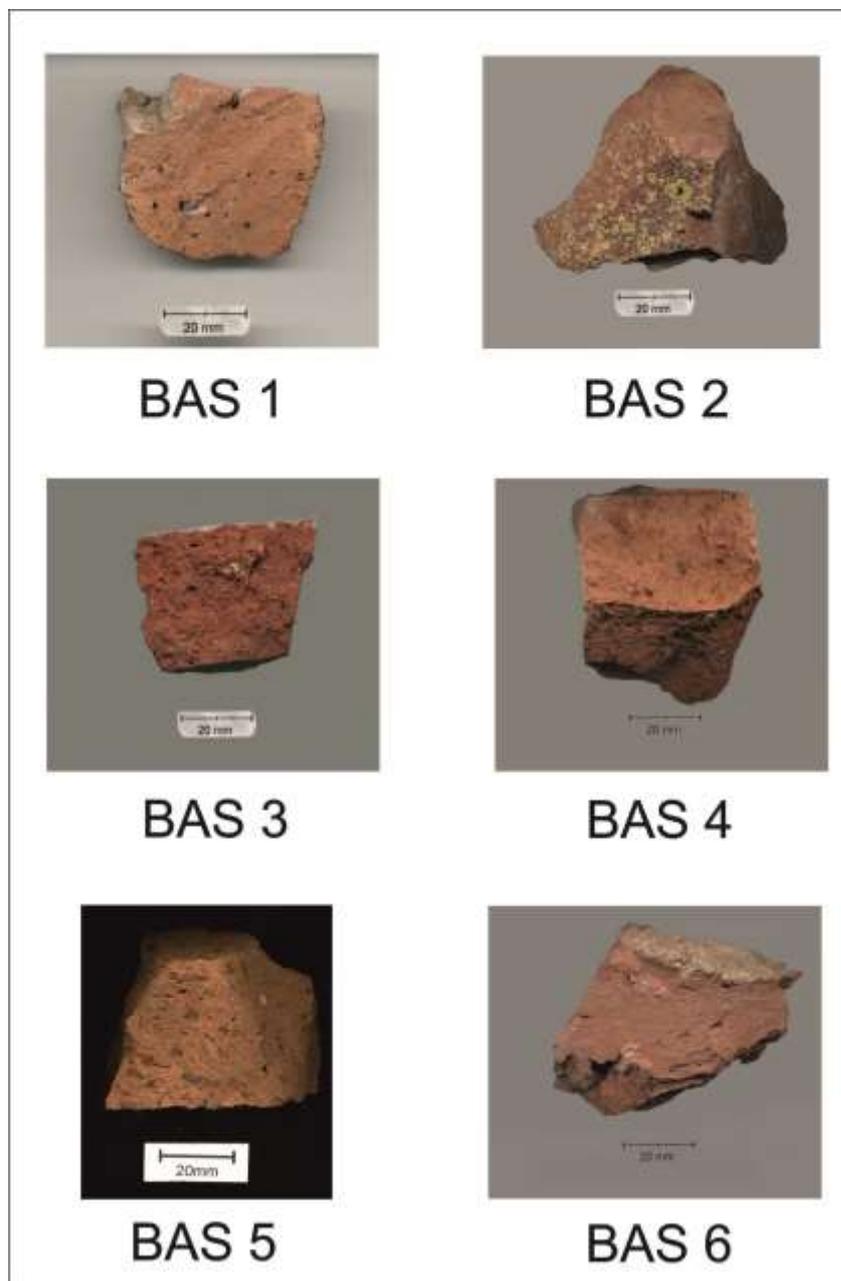


Fig. 2.2_I. Immagini macroscopiche dei 29 campioni di laterizio prelevati da Hagia Sophia ottenuti mediante acquisizione con scanner piano in luce riflessa.

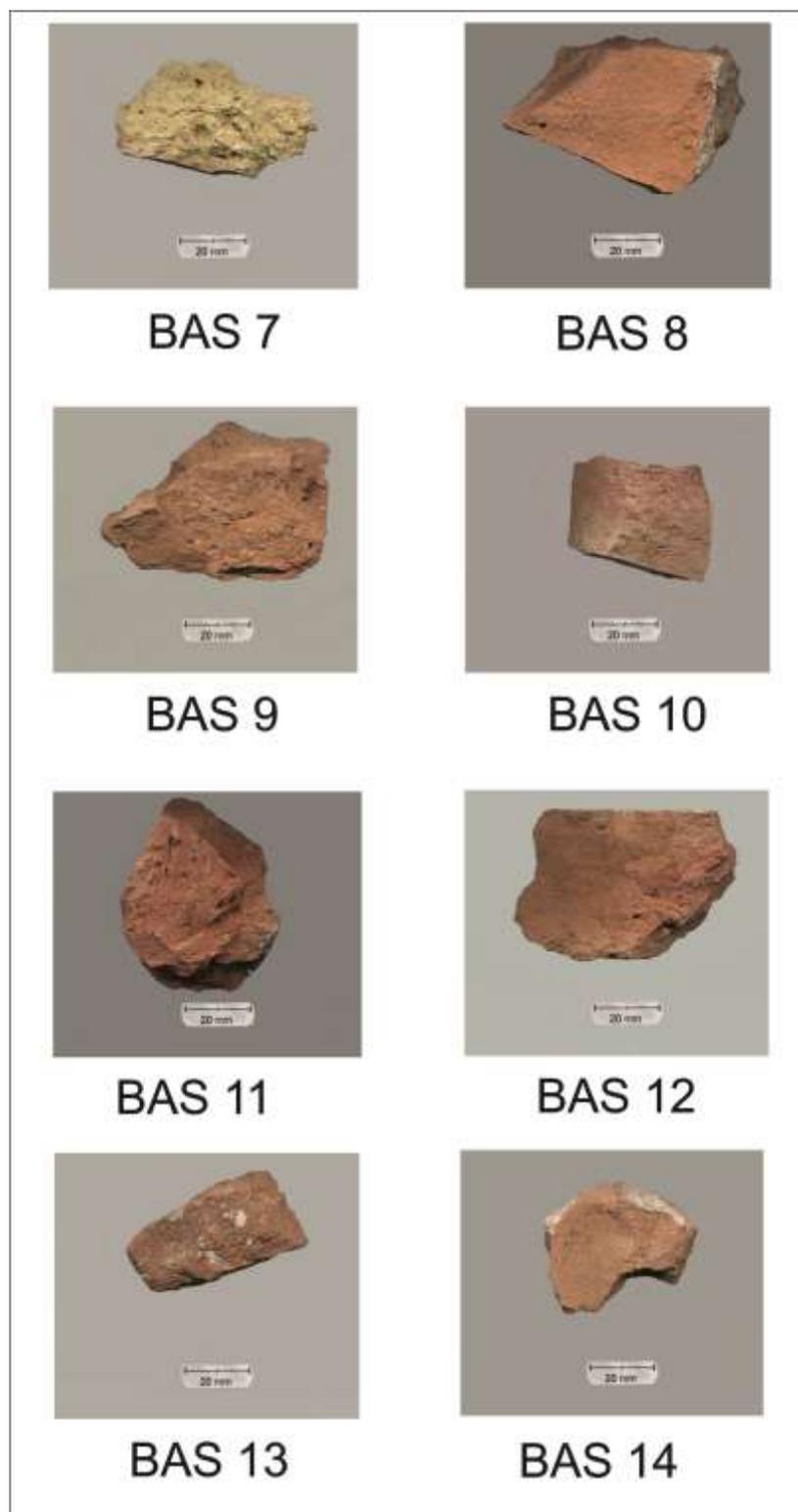


Fig. 2.2_II. Immagini macroscopiche dei 29 campioni di laterizio prelevati da Hagia Sophia ottenuti mediante acquisizione con scanner piano in luce riflessa.



Fig. 2.2_III. Immagini macroscopiche dei 29 campioni di laterizio prelevati da Hagia Sophia ottenuti mediante acquisizione con scanner piano in luce riflessa.

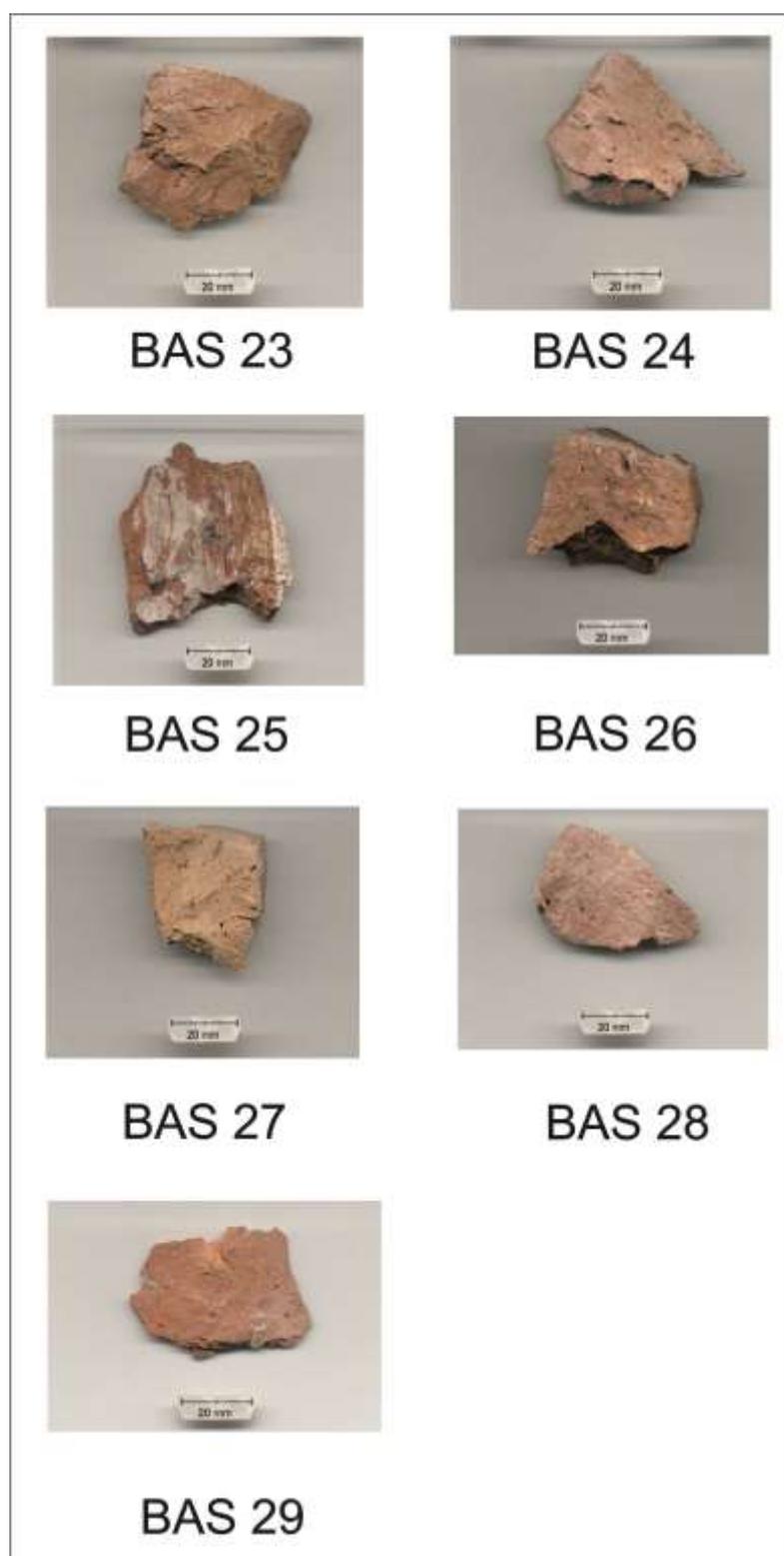


Fig. 2.2_IV. Immagini macroscopiche dei 29 campioni di laterizio prelevati da Hagia Sophia ottenuti mediante acquisizione con scanner piano in luce riflessa.

Il campionamento è stato effettuato su diverse zone dell'edificio ed ha riguardato principalmente la parte esterna. In particolare sono stati prelevati:

- n. 13 campioni sull'esterno del prospetto nord (Fig. 2.3),
- n. 12 campioni sul prospetto ovest (Fig. 2.4),
- n. 3 campioni sul prospetto sud (Fig. 2.5).
- n. 4 nei sotterranei di Hagia Sophia (Fig. 2.6)
- n. 2 all'interno di Hagia Sophia (Fig. 2.7)

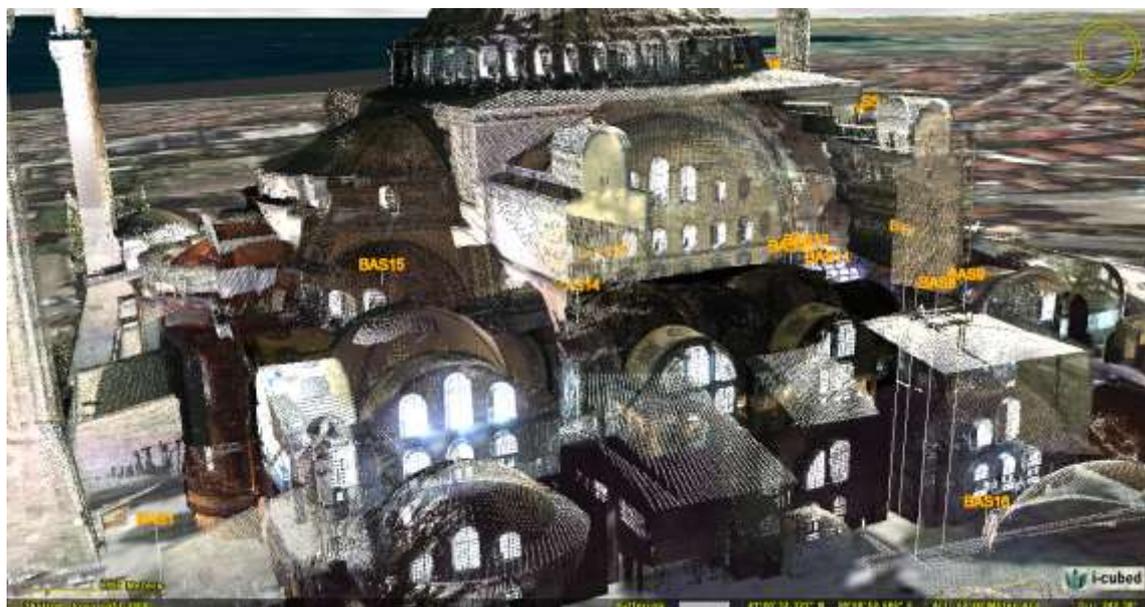


Fig. 2.3. Campioni prelevati dal prospetto nord, riportati nella schermata del GIS 3D.

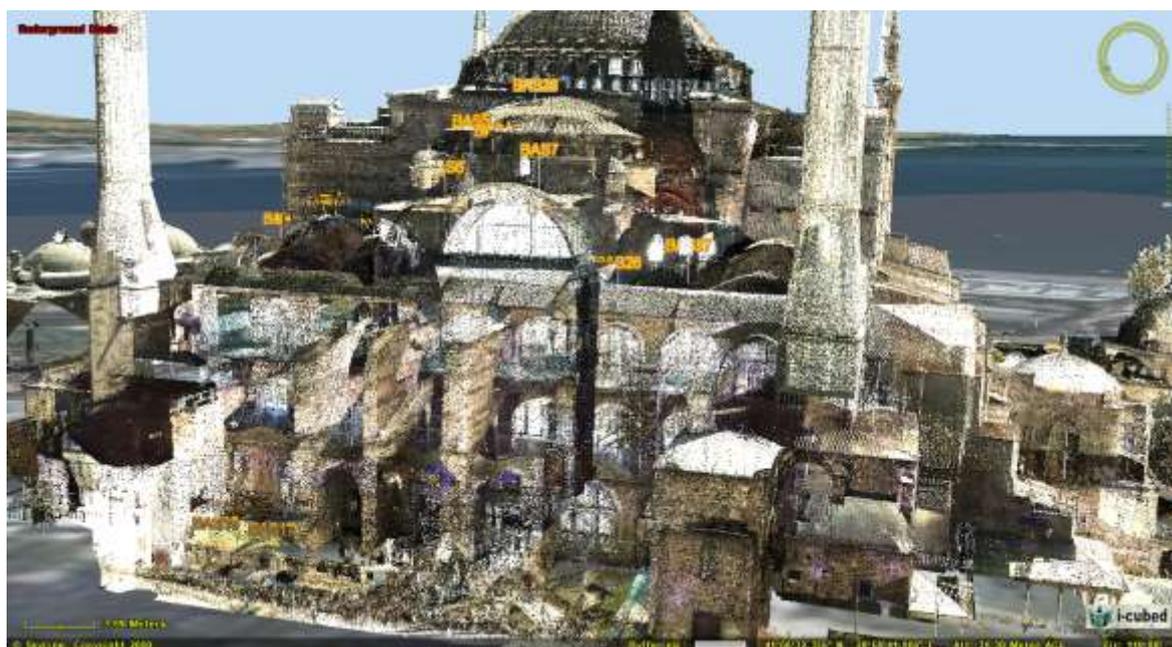


Fig. 2.4. Campioni prelevati dal prospetto ovest, riportati nella schermata del GIS 3D.

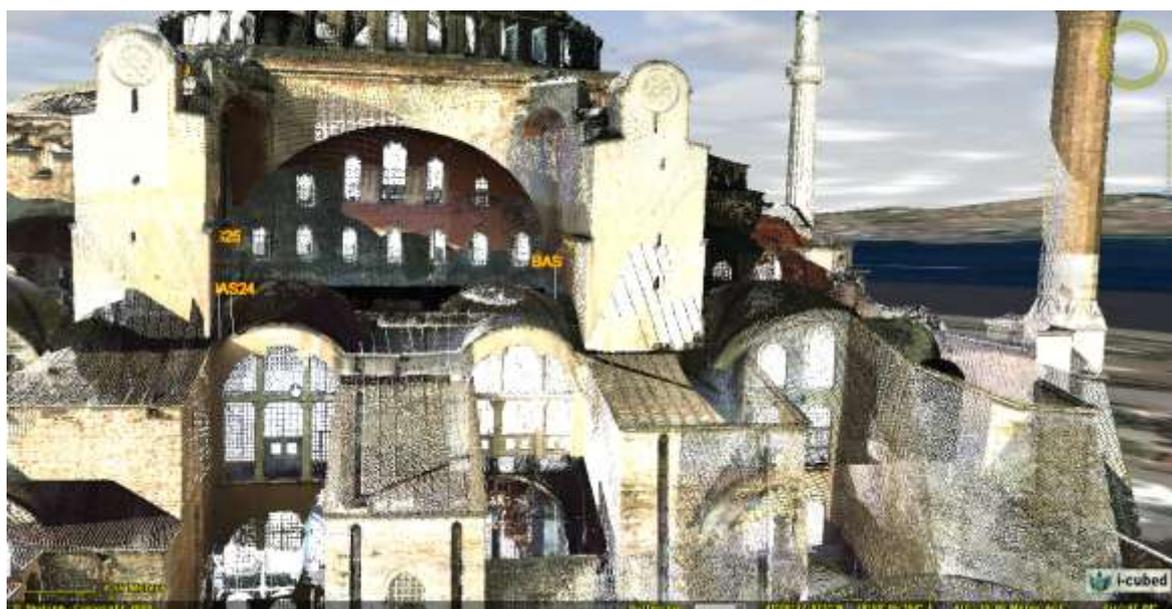


Fig. 2.5. Campioni prelevati dal prospetto sud, riportati nella schermata del GIS 3D.

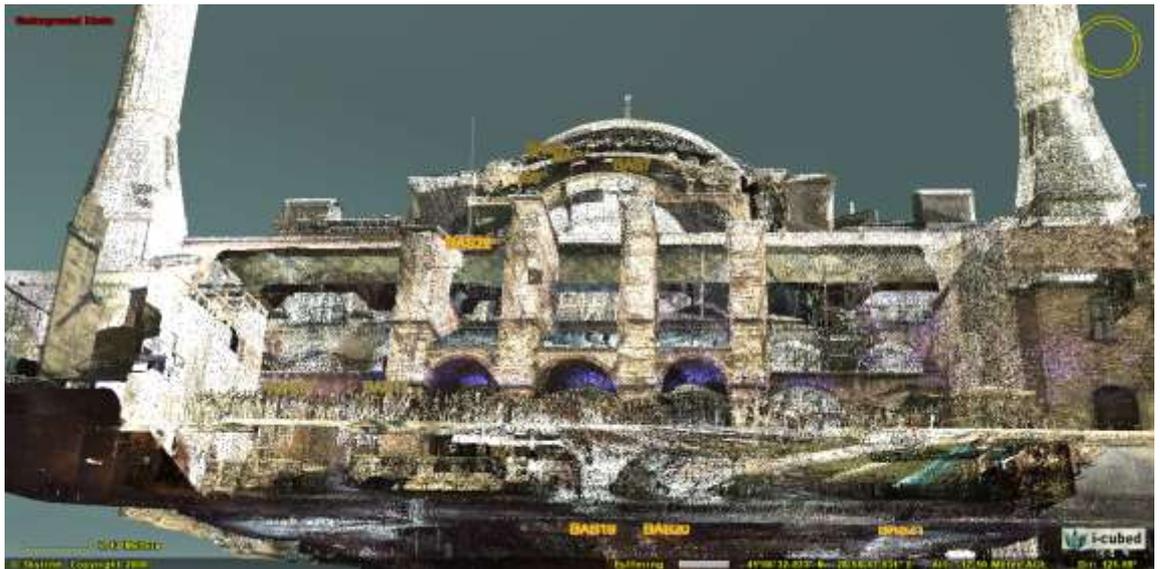


Fig. 2.6. Campioni prelevati nei sotterranei, vista prospettica nella schermata del GIS 3D.



Fig. 2.7. Campioni prelevati nella balconata interna del nartece ovest, vista prospettica dal GIS 3D ed integrazione con le foto del campionamento.

Attraverso studi di tipo storico-architettonico (Mainstone, 2009), ad ogni campione è stata associata una probabile datazione (Tab. 2.1).

Campione	Localizzazione dei prelievi sulla struttura	Probabile datazione basata su studi storici (Secolo)
BAS1	Porzione muro bizantino angolo NE	VI
BAS2	Muro perimetrale della scala di NW	VI
BAS3	Arco di scarico nella muratura perimetrale della scala di NW	X
BAS4	Muro perimetrale lato W	VI
BAS5	Muro perimetrale lato W	VI
BAS6	Muro perimetrale N, sopra Nartece	VI
BAS7	Muro perimetrale W, strato interno	VI
BAS8	Muro perimetrale contrafforte, scala NE	VI
BAS9	Muro perimetrale contrafforte, scala NE, in corrispondenza dell'arco di scarico	VI
BAS10	Intradosso dell'arco esterno del tympana, lato N	VI
BAS11	Muro di riempimento lato N, sotto arco di scarico del contrafforte, Scala NW	XIV
BAS12	Arco di scarico nella muratura perimetrale a N	VI
BAS13	Muro esterno del Tympana, lato N	VI
BAS14	Intradosso dell'arco esterno del tympana, lato N	VI
BAS15	Muro perimetrale lato E	VI
BAS16	Muro perimetrale lato N, piano terra	VI
BAS17	Muratura esterna lato W, fronte esonartece	IV
BAS18	Muratura esterna lato W, fronte esonartece	IV
BAS19	Murature al piano interrato	V
BAS20	Murature al piano interrato	V
BAS21	Murature al piano interrato	V
BAS22	Murature al piano interrato	IV
BAS23	Intradosso dell'arco esterno del tympana, lato S	VI
BAS24	Muratura esterna lato S, in corrispondenza imposta apertura	XIV
BAS25	Muratura interna lato S	VI
BAS26	Muro perimetrale lato SE	XIV
BAS27	Muro perimetrale lato SE	XIV
BAS28	Muratura interna, balconata del nartece a W	X
BAS29	Muratura interna, balconata del nartece a W	X

Tabella. 2.1. Tabella riassuntiva dei campioni di laterizio prelevati da Hagia Sophia con relativa tipologia, localizzazione e probabile datazione definita su studi di tipo storico (Mainstone, 2009).

2.2 I laterizi ed il loro processo produttivo

I primi mattoni usati nella storia vengono comunemente chiamati “mattoni crudi” (Achenza, 2008), si tratta di manufatti che vengono lasciati essiccare lentamente al sole, la cui origine è molto antica, vengono infatti documentati in età neolitica nella città di Gerico in Palestina (Kenyon, 1954). I primi muri di mattoni realizzati nella storia erano costituiti da una serie di elementi poggiati secondo un preciso ordine, l’uno sopra l’altro, in modo da ridurre al minimo gli spazi tra gli stessi e favorire un equilibrio statico della struttura verticale. In questi muri lo spessore in basso doveva essere sufficiente per reggere il peso soprastante (Mannoni, 2005).

Con il termine laterizio si indica un manufatto ceramico ottenuto dalla cottura di materiali argillosi, colorato e poroso, che subisce una cottura a temperature comprese tra 600 e 900 °C (Di Caprio, 2007). La cottura può avvenire in presenza o assenza di ossigeno (atmosfera ossidante o riducente).

Il laterizio è un materiale compatto di forma definita che si ottiene miscelando argilla, acqua ed altri materiali che danno particolari proprietà all’impasto: i degrassanti ed i fondenti. I materiali degrassanti e fondenti, definiti anche “complementari”, possono essere già presenti nell’argilla per via naturale (definiti quindi naturali) oppure possono essere aggiunti intenzionalmente all’impasto per diminuirne la plasticità (degrassanti) e/o per abbassare la temperatura di fusione (basso-fondenti) dei minerali argillosi (definiti quindi artificiali). Un particolare tipo di degrassante artificiale ricavato dal riuso di frammenti di terracotta o di altre ceramiche viene definito con il termine francese di “chamotte” (Shapiro & Kurdinovskii, 1933), che fu largamente usato in passato per il costo pressoché nullo della materia prima; oltre ad offrire una robusta struttura portante, diminuisce il ritiro dell’impasto e limita il rischio di fessurazione e rottura (Di Caprio, 2007).

L’uso del laterizio, come materiale frantumato (cocciopesto), perfezionato soprattutto dai Romani, e ampiamente usato nella tarda antichità e nel medioevo, fonda la sua diffusione anche sul reimpiego a cui si prestavano questi elementi di costruzione. In centri urbani caratterizzati da un’incessante attività di costruzione e demolizione, il reimpiego offriva la risposta più razionale a una serie di problemi, primo tra tutti quello dello smaltimento delle macerie.

Secondo Vitruvio le tegole, ad esempio, si prestavano ad essere riutilizzate come aggregato nell'impasto per la produzione di mattoni, dato che ne era già stata testata la resistenza agli agenti atmosferici. (Marano, 2014). La realizzazione di progetti di eccezionale ampiezza (come la realizzazione di Hagia Sophia di Istanbul) doveva necessariamente considerare gli elevati costi dell'approvvigionamento delle materie prime e la capacità delle fornaci di fornire il materiale necessario. Le proprietà dei laterizi cotti o *lateres cocti* (Buonfiglio, 2015) hanno permesso la realizzazione di maestosi edifici e strutture monumentali, come il Teatro di Marcello, edificato dai romani nel periodo Augusteo (17 - 11 a.C.), scandito da una serie continua di grandi archi con mattoni della misura costante di 40 cm. Il ruolo del laterizio rimane pressoché immutato nel tempo fino ai nostri giorni, come dimostrato dalla presenza di numerosi borghi ed edifici realizzati con questi materiali. L'evoluzione tecnologica ha permesso di aggiungere ai classici "mattoni pieni" altre categorie quali: *laterizi alleggeriti* (caratterizzati dalla presenza di pori dell'ordine del millimetro di diametro omogeneamente dispersi nella massa).

La prima fase del processo di produzione di un laterizio (o della ceramica) è l'estrazione in cava dell'argilla, la cui composizione influisce sulla qualità finale del manufatto ceramico. Prima della lavorazione del materiale argilloso bisogna portarlo ad una grana più fine, tramite un processo chiamato di "laminazione" o "rolling" (Williamson, 1954), che consiste in una sorta di purificazione attraverso l'utilizzo di vasche di decantazione. All'argilla purificata e laminata viene poi aggiunta dell'acqua per creare una miscela malleabile e quindi lavorabile. La quantità di acqua da aggiungere all'impasto varia in funzione della composizione dell'argilla e del tipo di modellazione (a mano, a tornio, ecc.); se l'acqua aggiunta è troppo poca l'impasto tenderà a sgretolarsi, mentre se l'acqua aggiunta è in eccesso il composto diventerà troppo fluido e non sarà possibile modellarlo. Durante la lavorazione possono essere aggiunti ulteriori componenti all'impasto. L'aggregato più comunemente utilizzato è la sabbia che, in qualità di "smagrante", consente di migliorare la fase di essiccazione e permette di controllare il ritiro del prodotto. Generalmente si usa la sabbia proveniente da spiagge lacustri o dagli alvei dei fiumi non torrentizi. L'uso di sabbia marina è invece sconsigliato, anche nella trattatistica antica, a causa della presenza di sali che

influiscono negativamente sulla qualità del laterizio (Gros, 1997). Frequentemente, soprattutto nella produzione di laterizi romani, venivano aggiunti anche pozzolana o paglia ai laterizi di dimensioni più grandi, per evitare che il mattone potesse lesionarsi (Beste & Filippi, 2015). L'impasto realizzato viene poi portato su un apposito banco da lavoro cosparso di sabbia, questa operazione ha la funzione di "disarmante", ossia di evitare che l'impasto si attacchi allo stampo. Il composto viene infine pressato negli stampi (operazione effettuata a freddo) che daranno la forma finale al manufatto. I laterizi realizzati vengono successivamente posti a terra e fatti essiccare, originariamente questa operazione veniva fatta solo all'esterno, limitando il periodo di produzione ai soli mesi estivi; attualmente il progresso tecnologico ha permesso di effettuare l'operazione di essiccazione anche all'interno di specifici ambienti. L'essiccamento migliora la resistenza meccanica permettendo l'accatastamento del materiale e l'avvio all'ultimo processo della lavorazione, la cottura che veniva effettuata in apposite fornaci a legna.

Dopo aver posizionato i laterizi in modo da far passare l'aria, vengono avviate tre fasi della cottura. La cottura è la fase in cui avviene il ritiro dell'argilla con una riduzione di porosità ed il conseguente sviluppo della resistenza meccanica.

Un particolare importante nella fase di cottura è rappresentato dalla miscela di gas e fumi che circondano i manufatti, infatti, la presenza di ossigeno in eccesso (atmosfera ossidante) determina la formazione di ossido ferrico (es: ematite) di colore rosso, mentre in un ambiente povero di ossigeno (atmosfera riducente) si diffondono ossidi di colore nerastro come la magnetite (Leonard & Herron, 1972). Anche la posizione che occupano i laterizi nella fornace influisce sul loro colore e sulla loro qualità. I manufatti cotti nella zona centrale del forno, ossia quella con una temperatura più alta, sono quelli con una resistenza meccanica maggiore e tendono ad assumere un colore giallino; mentre i campioni cotti alle estremità del forno, dove la presenza di ossigeno è maggiore e la temperatura più bassa, hanno una minore resistenza meccanica ed assumono un colore tendente al rosso.

2.2.1 I Laterizi di Hagia Sophia

Secondo la DIEGESIS, un testo del IX secolo, la cupola di Hagia Sophia è stata costruita con mattoni appositamente ordinati dall'isola di Rodi (Moropoulou, 2002b). La fonte indica che: "Speciali mattoni leggeri sono stati ordinati dall'isola di Rodi, di peso di un dodicesimo del peso del mattone normale, utilizzati per la costruzione dei quattro archi principali e della cupola". L'Università di Atene (Moropoulou, 2002b) ha effettuato analisi in attivazione neutronica (NAA), SEM-EDS, petrografiche (OM), mineralogiche (XRD), porosimetriche e termiche (DTA-TG), allo scopo di determinare la provenienza delle materie prime e ricavare informazioni sulle tecniche di realizzazione dei laterizi di Hagia Sophia. Il lavoro è stato effettuato sui campioni di Hagia Sophia, campioni delle mura di Teodosio (V secolo), della Chiesa Santa Irene (532 d.C.), della Chiesa Santi Sergio e Bacco (tra il 527 ed il 536 d.C.) e otto campioni dalla basilica di Rodi del VI secolo. Inoltre, è stata effettuata l'analisi delle componenti principali (PCA) sui dati ottenuti dai campioni di Rodi, Hagia Sophia e quelli delle altre chiese di Istanbul. Statisticamente il lavoro evidenzia una maggiore affinità tra i campioni di Hagia Sophia e quelli della basilica di Rodi. Secondo i dati XRD, tutti i campioni di Hagia Sophia e quattro campioni di Rodi sono stati realizzati con argille non calcaree. Secondo questo studio la probabilità che i campioni della cupola del VI secolo di Hagia Sophia appartengano al gruppo campione di Rodi è del 90%. Questo risultato confermerebbe quindi che i mattoni della cupola siano stati realizzati a Rodi. Questo studio dimostrerebbe, inoltre, che uno dei fattori che ha contribuito alla conservazione della cupola sarebbe stato il basso peso degli elementi strutturali.

Sempre lo stesso studio evidenzia che i laterizi di Hagia Sophia sono stati cotti a temperature intorno ai 750 °C, mentre quelli della basilica di Rodi intorno agli 800-850 °C. Inoltre, i campioni di Hagia Sophia, mostrano valori inferiori di densità apparente rispetto a quelli del gruppo Rodi e del gruppo di riferimento di Istanbul (1.6 g/cm³ per Istanbul e 1.7 g/cm³ per Rodi) ed una maggiore porosità totale (45% per Hagia Sophia rispetto al 35% per Istanbul e Rodi). Anche i dati dell'NAA mostrano una somiglianza tra i corpi di argilla dei mattoni di Hagia Sophia e quelli di Rodi, mentre non è stata trovata alcuna relazione con i campioni realizzati in officine locali.

Nel presente lavoro sono stati analizzati 29 campioni di laterizio prelevati in diversi punti dell'edificio di Hagia Sophia (vedi paragrafo 2.1), con lo scopo di eseguire una caratterizzazione chimica, mineralogica e petrografica dei campioni e confrontare i risultati ottenuti con lo studio riportato in precedenza (Moropoulou, 2002b).

2.3 Tecniche analitiche per la caratterizzazione dei laterizi

Il miglior modo per ricavare informazioni composizionali sui laterizi è quello di applicare un approccio di tipo multi analitico. La combinazione di tecniche microscopiche (OM), chimiche (XRF), mineralogiche (XRPD), fisiche (DSC/TG), spettroscopiche (Raman) e microchimiche (SEM-EDS), consente di ottenere informazioni importanti sulla tecnologia produttiva dei laterizi e di formulare ipotesi sulla provenienza delle materie prime utilizzate nella loro produzione.

Le tecniche analitiche utilizzate nel lavoro di tesi sono di seguito elencate.

2.3.1 Microscopia ottica a luce polarizzata trasmessa

Al fine di caratterizzare i laterizi da un punto di vista mineralogico e petrografico è stata eseguita l'analisi attraverso un microscopio ottico polarizzatore a luce trasmessa (Fig. 2.8).



Fig. 2.8 Microscopio ottico polarizzatore a luce trasmessa.

Questo genere di microscopio permette di osservare immagini a vari ingrandimenti degli oggetti esaminati e di effettuare una serie di operazioni che rendono possibile la

determinazione delle caratteristiche ottiche e, quindi, il riconoscimento dei minerali (Peccerillo & Perugini, 2005).

Tale tecnica è la più importante tra tutte quelle che si utilizzano per studiare i materiali ceramici ed è finalizzata ad ottenere le informazioni minero-petrografiche, fondamentali per pianificare tutto il processo di caratterizzazione.

Per poter essere studiati al microscopio ottico polarizzatore a luce trasmessa i laterizi devono essere portati ad uno spessore tale da poterne determinarne le relative caratteristiche ottiche, preparando quella che viene definita “Sezione Sottile” (Peterson, 2009). Una sezione sottile viene creata tagliando un frammento del materiale da studiare (Fig. 2.9) con uno spessore di circa 1 cm, incollando la superficie piana risultante su un apposito vetrino e levigandola fino a portarla ad uno spessore di 30 micron.



Fig. 2.9 Taglio dei laterizi di Hagia Sophia nei laboratori del DiBEST dell’Università della Calabria.

Se il materiale si presenta molto poroso o friabile, può essere impregnato di resina epossidica. Quando la sezione è terminata può essere coperta attraverso un ulteriore vetrino copri oggetto; in genere, però, si preferisce lasciare la sezione scoperta, lucidandola, in modo da renderla idonea all’applicazione di tecniche microanalitiche. I frammenti “avanzati” durante la preparazione della sezione sottile vengono conservati ed archiviati per poter essere riutilizzati per ulteriori analisi.

L'analisi in microscopia ottica ha permesso di determinare le caratteristiche minero-petrografiche dei campioni quali: le dimensioni minime e massime (in μm) dei non-plastic elements, la loro classe dimensionale media (Wentworth, 1922), le fasi mineralogiche e i frammenti di roccia presenti, il "Sorting" ovvero la classazione dei non-plastic elements (Jerram, 2001; Boggs, 2010), l'isotropia della matrice, la sfericità e l'arrotondamento dei clasti (Powers, 1953).

Inoltre, è stata eseguita una analisi modale classica per stimare le percentuali di matrice, frammenti mono e polimineralici, macro pori, chamotte e calcite secondaria (Di Caprio & Sarah, 1993). Lo studio delle sezioni eseguito tramite l'analisi modale (Di Caprio, 2007) ha permesso di accertare il valore percentuale dei componenti della sezione sottile, effettuando una stima più o meno precisa dell'area occupata da ciascuno. L'analisi modale è stata eseguita al microscopio ottico polarizzatore mediante un "contatore di punti" costituito da un tavolino traslatore che si sposta di dimensioni prestabilite lungo un piano X-Y (Fig. 2.10).

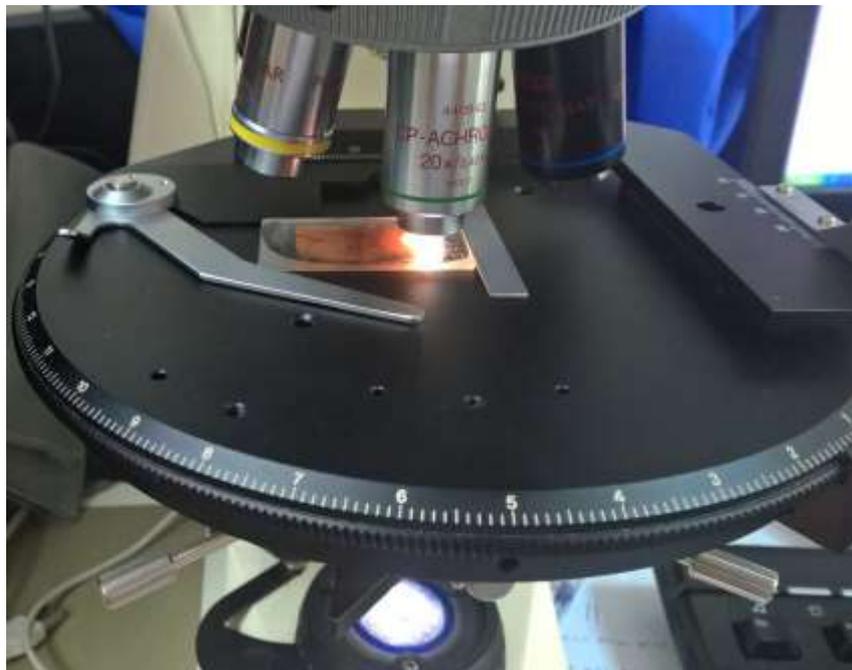


Fig. 2.10 Dettaglio del tavolino conta-punti, montato sul microscopio ottico polarizzatore, utilizzato per l'analisi modale dei frammenti di laterizio di Hagia Sophia.

Tramite una apposita cremagliera, la sezione sottile avanza di un intervallo prestabilito, lungo allineamenti paralleli scelti dall'osservatore e, per ogni punto della sezione inquadrato dall'obiettivo del microscopio, l'osservatore annota le caratteristiche di quanto osservato. L'operazione viene effettuata sull'intera sezione sottile e dalla sommatoria dei vari punti analizzati si ricava il valore percentuale dei componenti presenti. Per "tarare" al meglio l'analisi modale è stato scelto un campione rappresentativo (il BAS2), sul quale sono stati effettuati diversi conteggi a diversi intervalli, per calcolare la dimensione ottimale dello spostamento del tavolino "contapunti", sia nella componente orizzontale che in quella verticale.

Sulla sezione in oggetto è stato eseguito il conteggio con i seguenti intervalli:

- 0.2 mm E-W e 0.5 mm N-S con obiettivo 20X, contando un totale di 5455 punti;
- 0.5 mm E-W e 0.5 mm N-S, con obiettivo 20X, contando un totale di 2242 punti;
- 1.0 mm E-W e 1.0 mm N-S, con obiettivo 20X, contando un totale di 576 punti.

I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 2.2.

Spostamento tavolino contapunti lungo le componenti verticali ed orizzontali; 0.2 Est-West and 0.5 North South obiettivo 20X						
MATRICE	FRAMMENTI MONOMINERALICI	FRAMMENTI POLIMINERALICI	PORI	CHAMOTTE	CALCITE SECONDARIA	TOTALE
4247	166	231	301	3	507	5455
77.86%	3.04%	4.23%	5.52%	0.05%	9.29%	100.00%
Spostamento tavolino contapunti lungo le componenti verticali ed orizzontali; 0.5 Est-West and 0.5 North South, obiettivo 20X						
MATRICE	FRAMMENTI MONOMINERALICI	FRAMMENTI POLIMINERALICI	PORI	CHAMOTTE	CALCITE SECONDARIA	TOTALE
1735	72	93	132	3	207	2242
77.39%	3.21%	4.15%	5.89%	0.13%	9.23%	100.00%
Spostamento tavolino contapunti lungo le componenti verticali ed orizzontali; 1.0 Est-West and 1.0 North South, obiettivo 20X						
MATRICE	FRAMMENTI MONOMINERALICI	FRAMMENTI POLIMINERALICI	PORI	CHAMOTTE	CALCITE SECONDARIA	TOTALE
452	20	22	35		47	576
78.47%	3.47%	3.82%	6.08%	0.00%	8.16%	100.00%

Tabella 2.2. Conteggio minerali eseguito a diversi intervalli per valutare le condizioni analitiche ideali con cui eseguire l'analisi modale.

Osservando i valori in Tabella 2.2 si nota che le percentuali dei minerali da conteggiare non hanno subito considerevoli variazioni, si è pertanto deciso di conteggiare gli elementi per tutte le sezioni con il seguente settaggio: 1.0 mm E-W e 1.0 mm N-S, con obiettivo 20X.

2.3.2 Diffrattometria a raggi X su polveri (XRPD)

Per identificare le fasi mineralogiche dei laterizi di Hagia Sophia, una parte dei 29 campioni è stata polverizzata per essere analizzata mediante diffrazione a raggi X su Polveri (XRPD). Questa tecnica analitica permette di individuare anche i minerali criptocristallini non identificabili al microscopio ottico polarizzatore, pertanto rappresenta un'utile metodologia di supporto agli studi petrografici.

L'analisi si basa sull'identificazione di un angolo di diffrazione θ di un fascio di raggi X che incide su un minerale. Tra i diversi modi di interpretazione del fenomeno della diffrazione dei raggi X uno dei più diffusi è quello avanzato da Bragg (Fig. 2.11), secondo quest'ultimo due onde in fase tra di loro, colpiscono con un certo angolo due atomi che si trovano ad una distanza tra gli atomi pari a d . Dall'esperimento portato avanti da Bragg risulta che l'angolo di incidenza e l'angolo di riflessione sono uguali, la condizione affinché le onde siano ancora in fase dopo la riflessione è che il percorso CBD (Fig. 2.11) sia un numero intero (n) della lunghezza d'onda (λ), ossia $n\lambda$, ma, geometricamente, le distanze CB e BD sono uguali tra di loro alla distanza d per il seno dell'angolo di riflessione θ , ossia $d \sin \theta$. Quindi avremo che:

$$n\lambda = 2d \sin\theta$$

in cui:

- n rappresenta un numero intero che indica l'ordine dell'interferenza.
- λ è la lunghezza d'onda della radiazione X impiegata;
- d è la distanza interplanare della famiglia di piani che hanno dato luogo al fenomeno della diffrazione;
- θ è l'angolo formato dalla radiazione X incidente e la famiglia di piani considerati.

Lo strumento utilizzato per l'analisi è un diffrattometro costituito generalmente da un tubo a raggi X, un portacampione, un rivelatore ed un sistema di amplificazione e registrazione dei dati (Fig. 2.12).

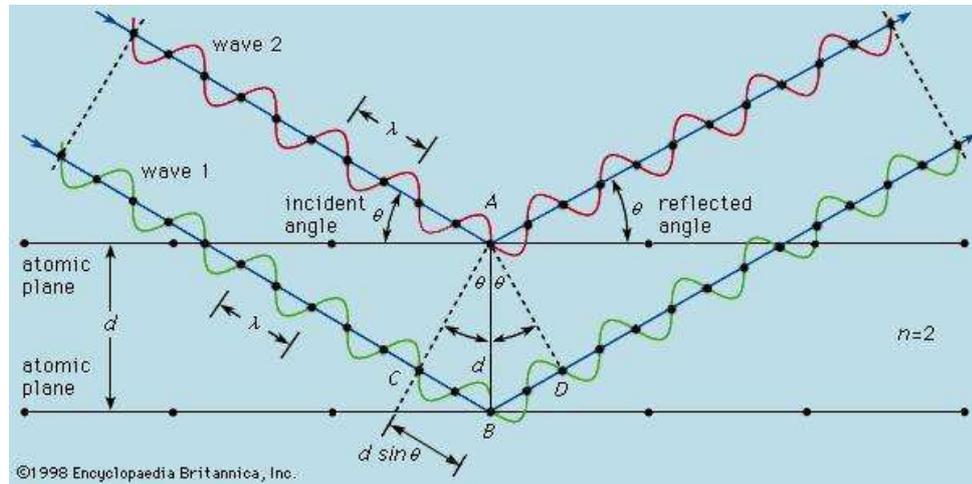


Fig. 2.11 Schematizzazione della legge di Bragg.

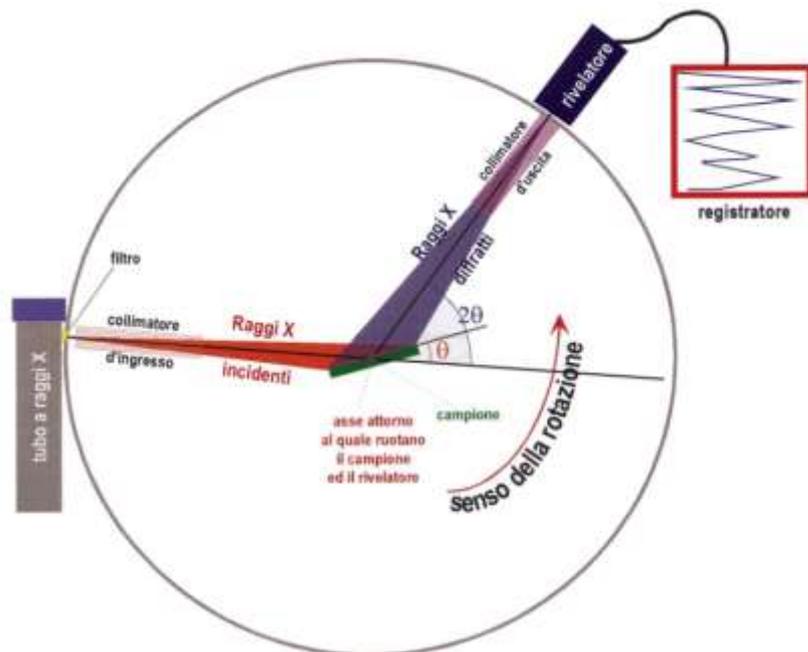


Fig. 2.12 Schema semplificato di un diffrattometro a raggi X [Morbidelli 2003].

Il campione polverizzato è posizionato all'interno di un apposito contenitore e la polvere viene pressata per livellare la superficie, in modo da eliminare eventuali asperità che potrebbero influire sull'angolo di incidenza dei raggi X (Fig. 2.13).

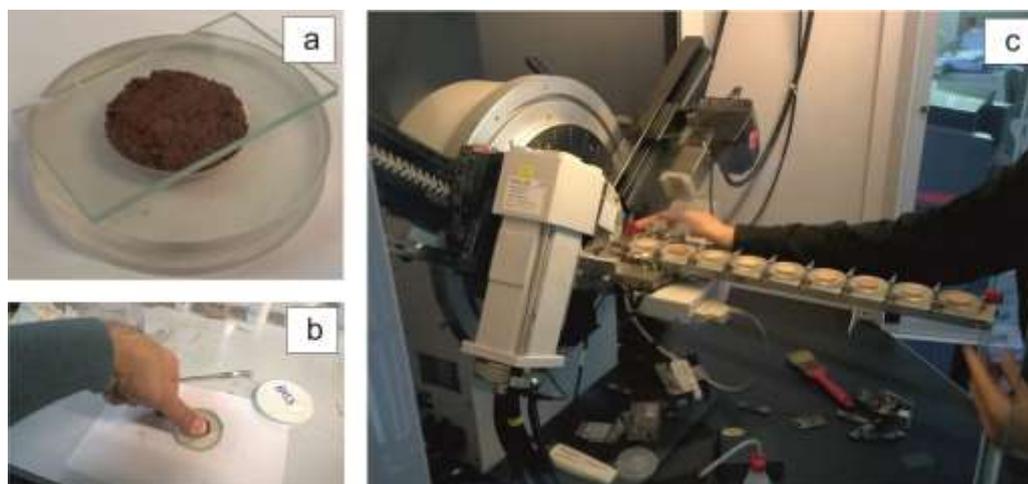


Fig. 2.13 Preparazione dei campioni per le analisi XRPD (a-b); caricamento dei campioni nel diffrattometro (c).

Lo strumento utilizzato per questo tipo di analisi è un diffrattometro Bruker modello D8 Advance, con radiazione Cu-K α , operante a 40 KV e 40 mA. I diffrattogrammi sono stati collezionati nel range compreso tra 3°-60° 2 θ utilizzando un intervallo di 0.02° 2 θ ed un tempo di conteggio di 0.4 s.

L'interpretazione dei diffrattogrammi è stata poi eseguita mediante il software EVA (DIFFRACplus EVA) per identificare le fasi mineralogiche, comparando i picchi sperimentali con pattern di riferimento della libreria PDF2.

2.3.3 Spettrometria a fluorescenza di raggi X (XRF)

Per caratterizzare chimicamente i campioni di laterizio di Hagia Sophia si è fatto ricorso alla spettrometria a fluorescenza di raggi X (Fig. 2.14); questa analisi consente di identificare gli elementi chimici maggiori (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅), espressi in percentuale in peso (%wt), e gli elementi in tracce espressi in parti per milione (ppm), presenti nel campione analizzato.

Le radiazioni X della fluorescenza vengono utilizzate per identificare gli elementi chimici, mediante la misurazione della lunghezza d'onda e/o dell'energia e dell'intensità delle radiazioni caratteristiche emesse da un campione che viene colpito da raggi X da parte di una sorgente radiogena (Di Caprio, 2007).

Il principio dell'analisi impiega una particolare radiazione X che consente di creare, per effetto fotoelettrico, una vacanza in un guscio interno dell'atomo di un elemento; questa posizione viene successivamente rioccupata da un elettrone che appartiene ad un guscio più esterno. Lo spostamento di un elettrone produce un fotone che ha una energia pari alla differenza tra le energie dell'elettrone nelle due posizioni iniziali e finali (Gigante & Ridolfi, 2015). Nel ritornare allo stato fondamentale, gli atomi eccitati producono l'emissione di spettri di fluorescenza X, le cui firme spettrali sono caratteristiche dei vari elementi presenti nel campione analizzato (Di Caprio, 2007).

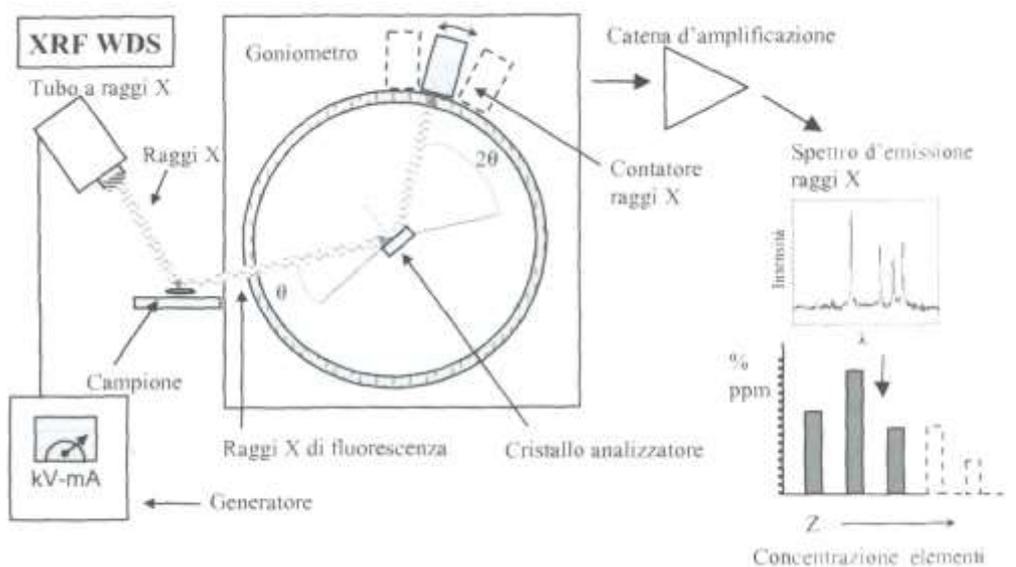


Fig. 2.14 Schema funzionamento fluorescenza a raggi X per dispersione di lunghezza d'onda (XRF-WDS) [Di Caprio, 2007].

Nell'analisi XRF, di tipo distruttivo, il campione viene finemente polverizzato. 6 grammi di polvere vengono miscelate con dell'alcool polivinilico, fino ad ottenere un composto omogeneo. Posto in apposito forno per essiccazione, il composto viene nuovamente polverizzato e posto su un fondo di acido borico all'interno di un apposito

contenitore di alluminio. Una volta pressato ad una pressione di circa 25 bar, se ne ottiene una pasticca pronta per l'analisi.

Le analisi XRF sono state eseguite presso i laboratori del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pisa, mediante uno Spettrometro a fluorescenza di raggi X della ARL 9400 XP+. Le analisi sono state effettuate utilizzando le condizioni strumentali riportate da Lezzerini et al. (2013; 2014).

Inoltre, su tutti i campioni è stata eseguita la perdita per calcinazione (LOI: Loss On Ignition), per determinare il contenuto di elementi volatili presenti all'interno dei reticoli cristallini dei minerali.

2.3.4 Analisi in componenti principali

L'analisi in componenti principali (ACP) è una tecnica statistica di tipo descrittivo, che consente di riscrivere i dati in una forma più leggibile in modo da poter cogliere facilmente eventuali relazioni tra le variabili. Spesso, quando si lavora su dati geochimici o petrografici, occorre descrivere appropriatamente le relazioni che intercorrono tra numerosi campioni su cui sono state fatte diverse decine di misure; se volessimo considerare contemporaneamente tutte le variabili, ci sposteremmo in ambiti dimensionali superiori a tre e i punti che definiscono le osservazioni non sarebbero più rappresentabili. Come sostituire alle p variabili di partenza un numero q , inferiore a p , di nuove variabili (dette componenti principali) combinazioni lineari delle variabili originali, in modo che queste q variabili rappresentino il più fedelmente possibile le p variabili iniziali? Per fare ciò occorre proiettare i punti a p dimensioni in uno spazio bidimensionale. In pratica sarà necessario definire un piano (il piano delle componenti principali) in cui le distanze siano conservate il più possibile nella loro forma originaria. Il criterio guida sarà quello di trovare il piano che passa il più vicino ai punti della nuvola, rendendo minima la media dei quadrati delle distanze tra i punti proiettati e quelli originali.

Attraverso dei procedimenti di algebra lineare è possibile individuare il vettore unitario v tale che la proiezione degli n punti giacenti nello spazio a P dimensioni sulla retta individuata da v sia la più fedele possibile. Ricordandoci il significato intuitivo

della nozione di varianza, una proiezione sarà tanto più fedele quanto più grande risulterà la dispersione dei punti ottenuti dalla proiezione sulla retta, ovvero quanto più grande sarà la varianza dell'insieme di punti, che ora costituiscono un campione di numeri reali. I vettori v_1, \dots, v_p lungo i quali la nuvola di punti ha la massima dispersione, non sono altro che gli autovettori della matrice di covarianza. Essa non è altro che la matrice $p \times p$ che ha come elemento di posto ij la covarianza tra la variabile X_i e la variabile X_j . Ogni autovettore della matrice di covarianza Γ è associato a un autovalore λ , tale che

$$\Gamma v = \lambda v$$

essendo la matrice di covarianza simmetrica, allora esisteranno tanti autovalori quante sono le variabili P , cioè

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$$

ed inoltre ci saranno altrettanti autovettori corrispondenti

$$v_1, v_2, \dots, v_p.$$

I vettori v_1, \dots, v_p si chiamano “direzioni principali”, v_1 è la “prima direzione principale”, v_2 la seconda e così via. Il piano che cercavamo non è altro che quello individuato dalle direzioni v_1 e v_2 e la proiezione della nuvola di punti su questo piano è quella nella quale i punti proiettati hanno massima dispersione. Questo piano si chiama “primo piano principale”; anche gli altri piani individuati da coppie di direzioni principali v_i, v_j vanno tenuti in considerazione. Questi piani prendono il nome di “piani principali” e le rispettive proiezioni su di essi possono fornire informazioni complementari.

Nella pratica occorre quindi calcolare gli autovalori della matrice di covarianza, dopo di che $\langle x_i; v_1 \rangle$ e $\langle x_i; v_2 \rangle$ sono le coordinate della proiezione di x_i sul primo piano principale (queste operazioni vengono comunemente effettuate da software specifici). La dispersione totale relativa ai punti nello spazio a P dimensioni, è uguale alla somma degli autovalori della matrice di covarianza:

$$dispersione\ totale = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|^2 = \sum \lambda_i$$

Allo stesso modo la dispersione dei punti proiettati sul piano principale è uguale a $\lambda_1 + \lambda_2$ e, più in generale, la dispersione della proiezione sul piano principale formato dai caratteri v_h e v_k è uguale a $\lambda_h + \lambda_k$. Si definisce “fedeltà” della proiezione su un piano il rapporto tra la dispersione dei punti proiettati e la dispersione totale; per esempio la fedeltà relativa alla proiezione sul primo piano principale vale:

$$\lambda_1 + \lambda_2 / \lambda_1 + \dots + \lambda_p$$

La fedeltà è un numero compreso sempre tra 0 e 1. Ovviamente tanto più la fedeltà risulterà prossima a 1, tanto più i punti proiettati saranno un’immagine fedele dei dati originali. Generalmente una proiezione su un piano principale viene considerata fedele alla realtà se la varianza (dispersione) dei punti proiettati è maggiore o almeno uguale al 60% della varianza totale.

Nel presente lavoro i dati chimici relativi alla composizione degli elementi maggiori sono stati processati seguendo le considerazioni di Aitchison riguardo ai dati composizionali (Aitchison, 1982, 1983, 1986), utilizzando le trasformazioni CRL (Centered Log Ratio). Tali trasformazioni consentono di limitare errori di false correlazioni tra variabili, dovute essenzialmente al fatto che confrontando tra loro una serie di numeri la cui somma è pari a 100 (come nel caso dei dati composizionali), si rischia di osservare relazioni fasulle tra le variabili geochimiche (Aitchison, 1982, 1983, 1986).

I dati sono stati analizzati tramite il software Statistica della Statsoft ottenendone i rispettivi grafici derivanti dall’applicazione della PCA (Principal Component Analysis) sui dati dei campioni di Hagia Sophia.

2.3.5 Analisi discriminante

Per analisi discriminante si intendono un insieme di metodologie tali che, un insieme di più misurazioni possono essere utilizzate per fornire una funzione discriminante lineare che, meglio di ogni altra funzione, discriminerà tra qualsiasi classe scelta (Fisher, 1938).

Supponiamo di avere dei gruppi di rocce su cui sono state misurate le variabili geochimiche; sarebbe interessante e estremamente utile trovare la combinazione lineare di queste variabili che produce la massima differenza tra i gruppi definiti precedentemente. Se si riesce a trovare una funzione che produce una differenza significativa tra le classi definite a priori, sarebbe possibile usarla per assegnare nuove rocce di origine sconosciuta a uno dei gruppi di partenza; l'analisi discriminante cerca di fare proprio questo. Consideriamo il caso più semplice di due gruppi definiti ciascuno da due variabili, x_1 e x_2 . Si può cercare la combinazione lineare delle variabili x_1 e x_2 tale che i due gruppi siano il più possibile distinti. Tale combinazione lineare è chiamata "funzione discriminante" e può essere scritta, generalmente in due modi diversi:

$$T - \bar{T} = K_1(X_1 - \bar{X}_1) + K_2(X_2 - \bar{X}_2) + \dots + K_p(X_p - \bar{X}_p)$$

oppure

$$t = k_1x_1 + k_2x_2 + \dots + k_px_p$$

I valori t e x_i sono espressi come deviazione dalla media. I coefficienti k_i sono chiamati "pesi discriminanti" e le variabili da x_1 a x_p sono le variabili discriminanti. Se p è uguale a 2 la funzione discriminante può essere semplificata nella forma:

$$t = k_1x_1 + k_2x_2$$

Tale formula può essere riscritta semplicemente utilizzando la notazione matriciale seguente:

$$t = X \cdot K$$

Nel caso di due gruppi, la funzione discriminante è soltanto una. In generale il numero delle funzioni discriminanti è pari a $g - 1$, dove g è il numero dei gruppi definiti a priori.

I metodi di analisi discriminante sono essenzialmente due, l'analisi discriminante lineare (LDA) e l'analisi discriminante quadratica (QDA). Entrambi sono metodi Bayesiani (Todeschini, 1998), quindi classificano gli oggetti in base alla seguente regola: un oggetto x_i viene classificato nella classe g se

$$p(g/x_i) > p(k/x_i) \quad \text{per tutti } k \neq g \text{ e } k=1, \dots, G$$

dove $p(g / x_i)$ è la probabilità a posteriori che l'oggetto x_i appartenga alla classe g , mentre G è il numero totale di classi. Questa probabilità viene calcolata dalla regola di Bayes:

$$p(g / x_i) = \frac{p_g f(x_i / g)}{\sum_k p_k f(x_i / g)}$$

dove p_g è la probabilità a priori della classe g e $f(x_i / g)$ è la densità di probabilità che una classe g contenga l'oggetto x_i . La densità di probabilità è generalmente ignota e deve essere stimata dagli oggetti del training set.

È importante sottolineare il fatto che entrambi i metodi di analisi discriminante sono invarianti alla scalatura dei dati. Ciò significa che i risultati non cambiano adottando tipi di scalature diverse o utilizzando direttamente i dati originali. Da un punto di vista rappresentativo, l'analisi discriminante consente di rappresentare su una coppia di assi cartesiani, nuvole dimensionali di punti, tali da evidenziare opportunamente le distanze tra i campioni.

Nel presente lavoro i dati sono stati analizzati con il software SPSS (Statistical Package for Social Science) della IBM. Partendo dai dati chimici è stata eseguita l'analisi discriminante assegnando a priori l'appartenenza di ciascun campione ad una data classe. La classe di appartenenza è rappresentata dalla datazione della messa in posa del laterizio, assegnata attraverso studi di tipo storico-architettonico (Mainstone, 1999; 2009) (vedi Tabella 2.1 paragrafo 2.1).

2.3.6 Analisi termiche

Le analisi termiche TGA (Thermogravimetric Analysis) e DSC (Differential Scanning Calorimetry), sui laterizi di Hagia Sophia, sono state effettuate con lo scopo di determinare, in atmosfera controllata, le variazioni in peso delle ceramiche in funzione della temperatura (Horowitz & Metzger, 1963).

Il sistema di misura è costituito da un forno riscaldante, due porta crogioli identici realizzati con apposito materiale che consente di resistere alle temperature di prova

senza interagire con il campione in esame (uno dei due rimane vuoto in quanto servirà come riferimento per la misura differenziale) e una termocoppia per la registrazione della temperatura del campione e del materiale di riferimento (Fig. 2.15). Un sistema di gas assicura un'atmosfera controllata, mentre un elaboratore collegato allo strumento, consente l'acquisizione e la visualizzazione dei dati.

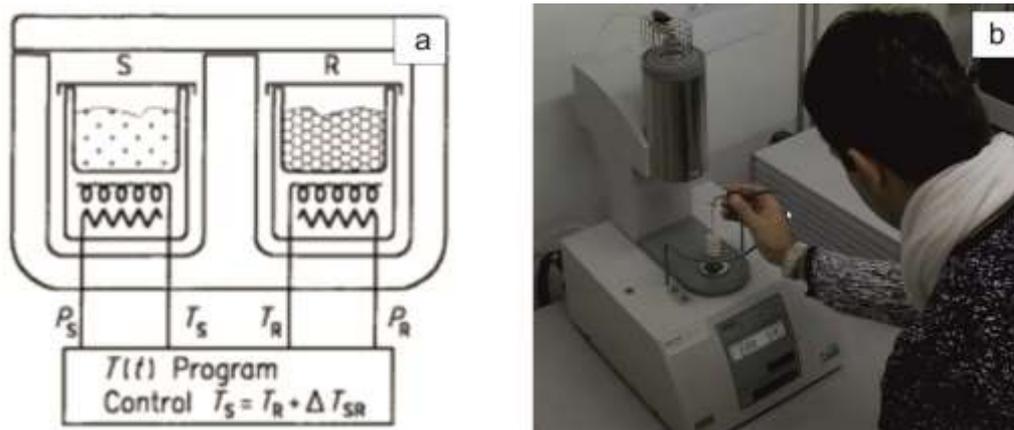


Fig. 2.15. (a) Analisi termogravimetrica TGA-DSC schematizzata [Klančnik et al., 2010];
(b) caricamento del campione all'interno dello strumento.

Lo strumento utilizzato per i laterizi di Hagia Sophia è un analizzatore termico Netzsch STA 449-C Jupiter presente nel dipartimento DiBEST (Biologia, Ecologia e Scienze della Terra) dell'Università della Calabria.

L'analisi inizia stabilizzando la bilancia e tarandola con il peso del crogiolo vuoto, in modo da avere la massima precisione possibile, successivamente si posiziona una quantità di circa 35-60 mg di campione finemente polverizzato all'interno del crogiolo per la misura sotto costante flusso di azoto a $30 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$. Il range di temperatura impostato è compreso tra $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e $910 \text{ }^\circ\text{C}$ mentre l'intervallo di riscaldamento è pari a $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$.

I valori vengono acquisiti da un apposito software che restituisce un termogravigramma che riporta, per quanto riguarda l'analisi TGA, sull'ascissa i valori del tempo utilizzato per l'analisi e sull'ordinata la variazione di massa in percentuale; mentre per l'analisi DSC riporta l'andamento del flusso termico tra il campione in esame e quello di riferimento (vuoto), mentre i due sono vincolati ad una temperatura

variabile definita a livello software; ogni variazione di temperatura tra i due crogioli è dovuta a fenomeni che insorgono nel materiale analizzato.

I termogravigrammi, fornendo informazioni sui meccanismi e sulle cinetiche delle molecole, possono essere utilizzati anche per il riconoscimento di alcuni minerali presenti nella polvere.

Attraverso questa tecnica viene misurata la quantità di calore emessa o assorbita dal campione rispetto ad uno standard di riferimento (contenitore vuoto), sottoponendo entrambi ad un riscaldamento progressivo.

In base ai valori ottenuti sono stati ricavati, per ogni campione, i valori di Acqua Strutturale o SBW (Structural Bound Water) ed il rapporto CO₂/Acqua Strutturale.

2.3.7 Spettroscopia Raman

Per identificare alcuni minerali presenti nei laterizi di Hagia Sophia è stata impiegata la spettroscopia vibrazionale Raman, accoppiata a un microscopio ottico.

Il principio alla base della tecnica Raman è la diffusione di una radiazione monocromatica che colpisce un campione. Questa radiazione può essere assorbita, riflessa o diffusa a seconda del tipo di interazione che si viene a creare; sarà assorbita se la radiazione ha energia pari ad una transizione ad un livello energetico superiore, sarà riflessa se la radiazione non interagisce con il campione, oppure diffusa se non causerà transizioni energetiche. Nel caso delle radiazioni diffuse, la diffusione può essere di due tipi (Fig. 2.16):

1. Diffusione attraverso interazione “*elastica*”, in questo caso i fotoni diffusi avranno la stessa energia di quelli incidenti; si tratta del tipo di diffusione più comune, conosciuta come diffusione di Rayleigh (Miles et al., 2001);
2. Diffusione attraverso radiazione “*anelastica*”, in questo caso si registra un trasferimento di energia dal fotone alla particella o viceversa; si tratta del caso meno frequente ed in questo caso si parla di diffusione Raman (Haskin et al., 1997).

Per ottenere lo spettro Raman di un campione si utilizza una sorgente monocromatica con lunghezza d'onda nel vicino UV, nel visibile o nel vicino infrarosso

(NIR). La radiazione laser è focalizzata sul campione; le radiazioni diffuse dalla superficie sono raccolte, rivelate dal detector e mostrate sotto forma di spettro.

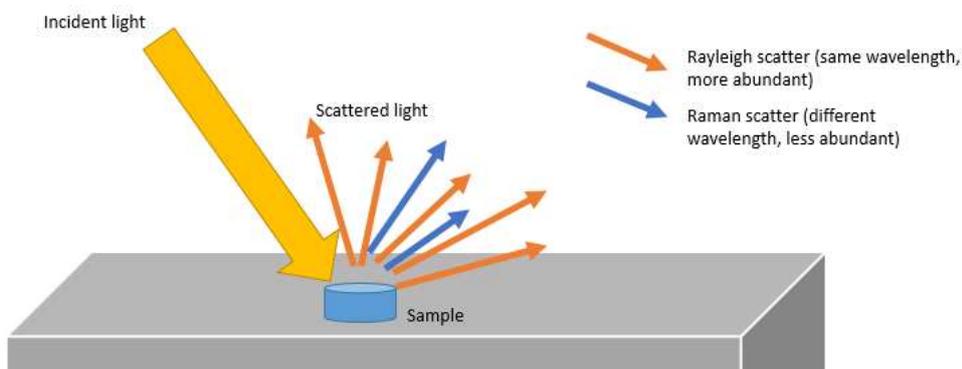


Fig. 2.16. Rappresentazione della diffusione di tipo elastico ed anelastico nella spettroscopia Raman.

Questa analisi è di tipo non-distruttivo, il campione viene posto tal quale all'interno dello strumento, e la zona da analizzare viene individuata attraverso un apposito microscopio collegato allo strumento ed a dei comandi che permettono di spostare il campione stesso.

A seguito dell'interazione tra fotone e molecola del mezzo colpito, se il fotone che esce dalla molecola ha una energia inferiore rispetto a quella che entra, verrà generato uno scattering di tipo Stokes. Questo è legato ai gruppi fondamentali delle molecole del campione ed ai loro caratteristici moti vibrazionali ed è pertanto utilizzato a scopo diagnostico per identificare qualitativamente i minerali presenti nel campione.

Lo strumento impiegato per questo tipo di analisi è un microscopio Raman Thermo Fisher DXR (Waltham, MA, USA), accoppiato con il software OMNICxi 1.0. Le analisi sono state eseguite utilizzando un obiettivo 50x e un grating con 900 ln/mm (FWHM). Il laser usato, allo stato solido, ha una lunghezza d'onda di 532 nm e una potenza variabile da 1.8 a 7 mW. La risoluzione spaziale del laser è di circa 3–5 μm .

2.3.8 Microscopia elettronica a scansione (SEM-EDS)

Per analizzare la composizione chimica dell'argilla presente nei laterizi di Hagia Sophia, oltre alla composizione chimica delle rocce non identificabili attraverso lo studio al microscopio ottico polarizzatore, si è utilizzata la microanalisi a dispersione di energia (EDS) mediante microscopio elettronico a scansione (SEM).

Il Microscopio Elettronico a Scansione (SEM) è basato sull'utilizzo di onde elettroniche al posto di onde luminose, in grado di fornire immagini che richiamano la forma tridimensionale dell'oggetto posto in esame, con un potere di risoluzione di circa 60 Å. L'analisi a dispersione di energia, a causa dell'impatto di energia cinetica degli elettroni si trasforma in calore, che potrebbe anche danneggiare il campione da analizzare, per ovviare a questa problematica la superficie da analizzare viene cosparsa da un sottile film di materiale conduttivo (carbonio nel nostro caso), che rende conduttiva la stessa superficie, questa operazione viene chiamata "metallizzazione" (Fig. 2.17). Per la metallizzazione è stato usato un metallizzatore Quorum modello Q150T ES (Fig. 2.17).

Quando il fascio di elettroni prodotti dall'EDS, impatta sul campione, produce una collisione che, a seconda che lo attraversino senza interagire oppure che colpiscano la materia creando interazione, viene chiamata "*elastica*" (nel primo caso) oppure "*anelastica*" (nel secondo caso).

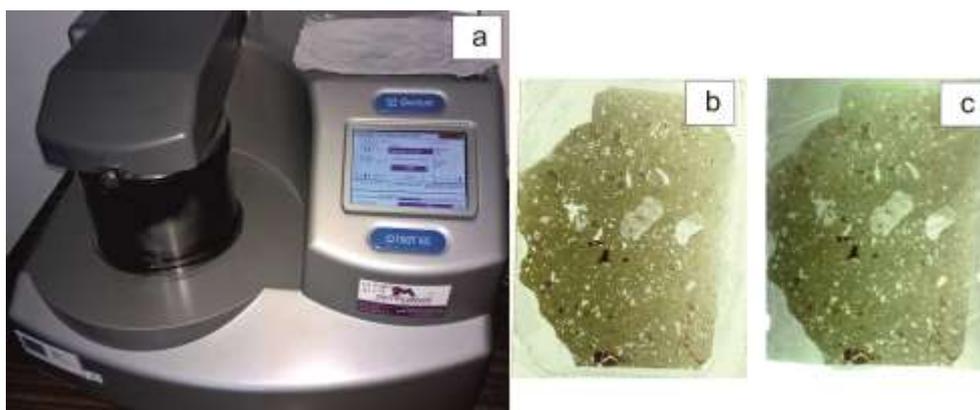


Fig. 2.17. (a) Sistema Quorum Q150T ES per metallizzare i campioni, (b) sezione BAS7 prima della metallizzazione (c) sezione BAS7 dopo la metallizzazione.

L'interazione elastica comporta una deviazione più rilevante delle traiettorie con una maggiore diffusione del fascio di elettroni all'interno della materia.

L'interazione anelastica genera le emissioni di raggi X con conseguente perdita di energia del fascio, queste ultime consentono di ottenere informazioni qualitative e quantitative sulla composizione chimica della materia analizzata (Fig. 2.18).

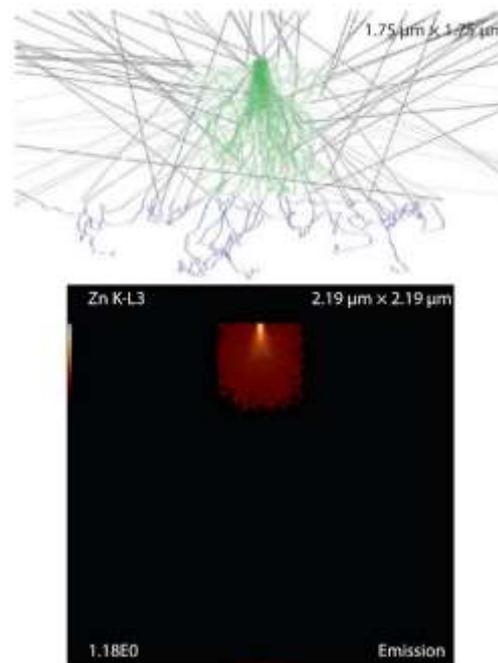


Fig. 2.18. Diffusione degli elettroni nella materia con microanalisi a raggi X [Goldstein et al., 2017].

Lo strumento utilizzato per l'analisi è un Electron Probe Microanalyzer (EPMA) modello Jeol – Jxa 8230, costituito da un generatore di sorgente al tungsteno che mette elettroni e cinque spettrometri dispersivi a lunghezza d'onda (Fig. 2.19).



Fig. 2.19. Electron Probe Microanalyzer (EPMA) modello Jeol – Jxa 8230 utilizzato per l'analisi dei campioni.

L'analisi EDS ha permesso di analizzare i Raggi X prodotti, misurandone la loro energia; il processo si basa su un rivelatore solido che trasforma l'energia dei fotoni X in impulsi elettrici e da un analizzatore che ne misura l'energia. Gli impulsi registrati vengono trasferiti ad un software ed al monitor che consente di comporre lo spettro di emissione, successivamente lo stesso viene processato ed elaborato per permetterne l'analisi quantitativa.

2.4 Sistemi GIS 3D

Il Geographic Information System o GIS è composto da una serie di strumenti software per acquisire, memorizzare, estrarre, trasformare e visualizzare dati spaziali dal mondo reale. Trattasi quindi di un sistema informatico in grado di produrre, gestire e analizzare dati spaziali associando a ciascun elemento geografico una o più descrizioni alfanumeriche (Burrough, 1986).

L'associazione dei dati spaziali avviene normalmente attraverso una rappresentazione cartografica o "mappa tematica" (Fisher, 1978; Hodgkiss, 1981), quest'ultimo termine viene utilizzato non solo per mostrare graficamente un generico tematismo ma anche per specifiche proprietà come la distribuzione di valori nello spazio o la variazione di incidenza tra due o più fattori.

Il termine “tematico” può essere sia di tipo qualitativo (come può essere nel caso di una rappresentazione di classi di uso del suolo) che di tipo quantitativo (come può essere nel caso di una rappresentazione della variazione di profondità di una superficie piezometrica); in entrambi i casi è possibile rappresentarli attraverso cartografie che assumono colori diversi al variare dei valori rappresentati, definiti come “choropleth map” (Fig. 2.20) o mappe colorate (Jenks, 1977).

Con l’avvento della fotogrammetria aerea nei primi anni 20 inizia la produzione di cartografie che ricoprono vaste aree con grande accuratezza migliorata ulteriormente con l’avvento della tecnica che permette di ricavare informazioni dall’utilizzo di specifici sensori denominata “remote sensing” (Ulaby et al. 1982).

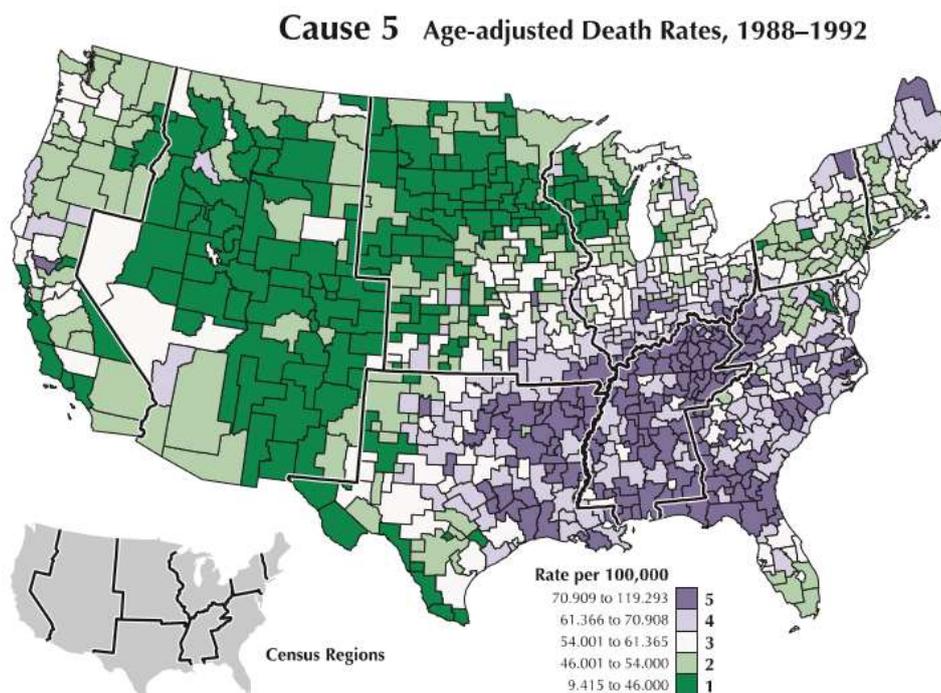


Fig. 2.20 Esempio di choropleth map [Brewer et al. 1997].

Tutte le informazioni qualitative ottenibili su una determinata area necessitavano di essere ora classificate e registrate attraverso metodologie quantitative. La mancanza di appropriati strumenti matematici e soprattutto la mancanza di calcolatori in grado di poterli gestire ne limitò la loro diffusione ed utilizzo. È solo intorno agli anni 60 con

l'avvento dei primi computer che l'analisi spaziale e la mappatura quantitativa sono stati in grado di fiorire (Ripley, 2005).

L'esigenza di poter disporre di dati spazialmente riferiti e di una contestuale analisi spaziale si allargò presto a numerosi campi, non solo alle scienze della terra ma anche a tutti coloro che pianificano studi di tipo urbanistico e di suddivisione del territorio, fino alla realizzazione di infrastrutture terrestri (strade, viadotti), oppure coloro che studiano flussi di persone per fini umanistici o antiterroristici.

La moltitudine di infrastrutture che possono essere mappate passa sotto al nome di "utilities" (Meyers, 1999), che vanno localizzate sotto forma di mappa o cartografia. e registrati in appositi contenitori digitali (database).

I database spaziali o "geodatabase" (Zeiler, 1999) codificano le informazioni spaziali in successioni di punti, polilinee e poligoni (entità elementari); dove i punti vengono rappresentati su un piano da una coppia di coordinate spaziali X-Y, le polilinee dall'unione di differenti coppia di coordinate spaziali X-Y ed i poligoni rappresentati da una area coperta da coordinate spaziali X-Y.

Queste entità elementari possono successivamente essere associate a dei tematismi grafici, diverse simbologie, colori o rappresentazioni testuali, associati ad una apposita legenda, permettono agevolmente di discriminare gli oggetti rappresentati nello spazio, questo tipo di rappresentazione è chiamata vettoriale.

L'avvento della fotogrammetria area, le immagini da satellite e la nuova aerofotogrammetria di prossimità realizzata con sistemi radiocomandati per riprese aeree (Droni), hanno permesso di integrare i geodatabase di un nuovo dato registrato su una matrice bidimensionale che contiene dati numerici codificata secondo "picture elements" o pixel (Sinaga, 2018), definendo i dati chiamati "raster data model" (Chang, 2018). Attraverso la rappresentazione raster è possibile comunque schematizzare elementi geometrici elementari come i punti le polilinee ed i poligoni della rappresentazione vettoriale. Nella rappresentazione raster i punti saranno definiti da singole celle (pixel), le linee come sequenze di punti prossimi tra loro e le aree come una continuazione di celle contigue (Fig. 2.21).

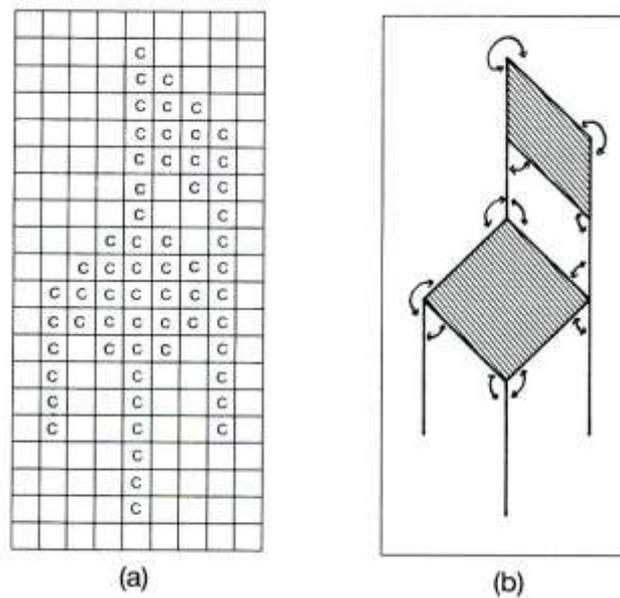


Fig. 2.21 Immagine di una sedia in formato raster data model (a) ed in formato vettoriale (b)
[Burrough, 1986].

Il bisogno di riconoscere e mappare proprietà della superficie terrestre e di geolocalizzarle correttamente ha generato appositi applicativi comunemente definiti come Geographic Information System (o GIS).

I GIS vanno quindi intesi come il risultato di processi di sviluppo paralleli per la gestione di dati spaziali (Fig. 2.22). I dati spaziali contenuti in un GIS descrivono oggetti del mondo reale in termini della loro posizione rispetto ad un conosciuto sistema di coordinate, dei loro attributi estranei alla posizione (es: colore o incidenza), delle loro relazioni spaziali con altri dati (relazioni topologiche).

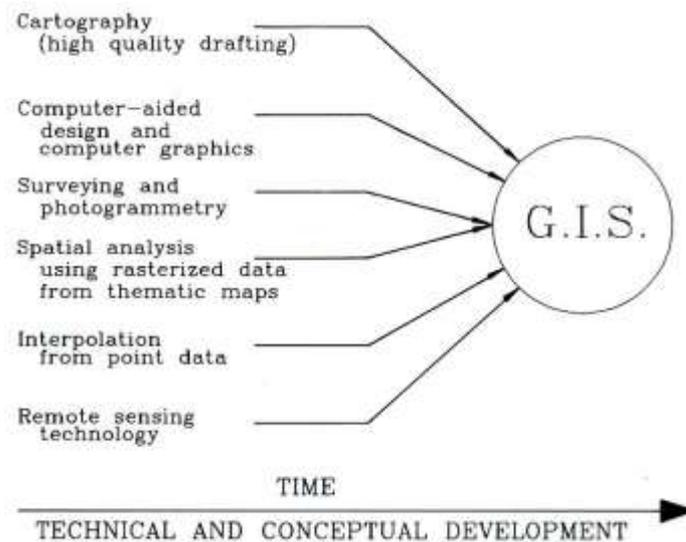


Fig. 2.22 Schema di rappresentazione temporale di un Geographic Information System (GIS)
[Burrough, 1986].

Le componenti necessarie alla realizzazione di un GIS possono essere riassunte in una componente hardware ed un software.

La componente hardware ha alla sua base una unità di elaborazione centrale (CPU) collegata ad una unità di archiviazione (disk drive o tape drive) che forniscono lo spazio per l'archiviazione dei dati. Si necessita inoltre di un dispositivo (digitizer o altro device) che converte i dati derivanti da cartografie o documenti in forma digitale in modo che possano esser letti correttamente dalla CPU (processo noto anche come normalizzazione). Un plotter o altro dispositivo simile permette di stampare il risultato derivante dalle analisi geografiche effettuate che viene costantemente monitorato da un utente attraverso un monitor o "visual display unit" (VDO).

La componente software di un GIS deve consentire all'utente, che interagisce con sistema, la verifica ed il caricamento dei dati geografici, la loro archiviazione e la loro gestione, la possibilità di esportare e presentare i dati e deve inoltre consentire la riproiezione geografica del dato, permettendone al contempo la modifica (editing).

La struttura del database deve consentire agli utenti, che utilizzeranno un GIS, di formulare un numero illimitato di interrogazioni al sistema stesso che vengono definite come "query" (Obe et al., 2015).

I dati geografici sono riferiti a luoghi sulla superficie terrestre attraverso un determinato sistema di coordinate che può essere di tipo locale, se riferito a studi su aree ristrette oppure può essere riferito ad un sistema di proiezione riconosciuto a livello nazionale o internazionale (es: UTM Universal Trasverse Mercator).

La rappresentazione cartografica di dati geografici viene riportata sulle mappe e rappresenta, quindi, un insieme di punti, polilinee e poligoni che sono definiti da coordinate geografiche nello spazio rispetto ad un sistema di coordinate (attributi geografici) e proprietà legate ad ogni elemento geografico codificati in un apposito contenitore chiamato database (attributi non geografici). Una mappa viene normalmente rappresentata in due dimensioni (X, Y), questo tipo di visualizzazione non esclude che gli attributi geografici possano contenere anche l'informazione relativa alla quota (Z) rendendo la mappa tridimensionale.

A seguito della creazione della struttura del database, che rappresenta il frutto di una accurata progettazione che tiene conto di tutti gli elementi che il database stesso deve contenere, si prosegue con il processo di codifica dei dati all'interno del database, questa operazione viene denominata di "data input". L'inserimento dei dati deve tenere conto dei seguenti due aspetti: la posizione nello spazio rispetto ad un dato sistema di coordinate e gli attributi associati ai vari dati rappresentati.

Il "data input" all'interno di un GIS può essere descritto attraverso due processi (Burrough, 1986): inserimento dei dati spaziali (digitalizzazione) e inserimento dei dati non spaziali (attributi associati al dato geografico).

a) Inserimento dei dati spaziali

Non esiste un modo univoco per inserire dati spaziali all'interno di un GIS, possono infatti essere utilizzati più sistemi singolarmente oppure combinati tra di loro, la scelta generalmente ricade su quest'ultima in quanto permette una maggiore flessibilità all'operatore che di volta in volta sceglie quella che meglio si adatta alle specifiche esigenze. Questo tipo di inserimento tiene conto di eventuali riferimenti rispetto ad una griglia georiferita, considerando i meridiani e i paralleli passanti per una determinata zona, oppure sfruttando coordinate già codificate all'interno del dato; l'informatizzazione degli ultimi anni mette a disposizione un sempre più ampio

portafoglio di dati scaricabili dalla rete ed il ricorso ad elaborate digitalizzazioni manuali; le scansioni di dati cartacei diviene sempre meno necessaria.

b) Inserimento dei dati non spaziali

Vengono rappresentati da alcune proprietà del dato stesso e su come questo voglia essere rappresentato. Caratteristiche come il colore che deve essere rappresentato sulla mappa, rientra ad esempio negli attributi “non spaziali” che un GIS deve gestire. Questi elementi vengono generalmente archiviati su file differenti che riportano lo stesso percorso ed il nome del file su cui sono archiviati i dati spaziali, questa separazione consente ai GIS di migliorare le capacità di analisi e calcolo diventando di fatto maggiormente efficienti.

Durante la codifica ed il caricamento dei dati possono sorgere degli errori sia connessi ai dati spaziali che a quelli non spaziali. La casistica degli errori comprende dai incompleti o duplicati, posizionati in spazi o a scale errate, oppure a causa di errori nella proiezione di questi dati si generano delle distorsioni nella loro rappresentazione cartografica. Essendo comune la generazione di errori durante “l’input” di dati spaziali e non, i GIS sono dotati di una serie di strumenti volti a manipolare ed uniformare i dati, passando per la fase definita di “data normalization” (Chunye & Delu, 2017). Questo processo assimila la mappa ad un foglio elastico che può essere allungato o compresso in tutte le direzioni, utilizzando mappe più accurate per scalarle correttamente oppure comparandole con dati vettoriali accurati (caposaldo).

Le più aggiornate versioni di software GIS implementano numerosi algoritmi che permettono trasformazioni e modifiche delle proiezioni cartografiche in modo ormai automatizzato; in questo caso bisogna però tener conto che l’algoritmo considera i dati da convertire come una serie di punti discreti di una superficie o volume continuo, questo tipo di trasformazione viene definita “convoluzione” (Goodchild et al., 2017).

La maggiore differenza tra un GIS ed un comune software cartografico risiede nella capacità del primo di manipolare i dati spaziali e trasformarli in modo da corrispondere a specifiche interrogazioni (query). I GIS consentono di operare sulla topologia e gli attributi dei dati geografici, sugli attributi dei dati non geografici oppure su entrambe simultaneamente. Il problema generale che deve risolvere un GIS attraverso una query è

quello di cercare in un database l'informazione richiesta archiviata sotto forma di mappa e creare un collegamento (o link) tra il database e la risposta (rappresentata dall'output della query); la risposta può essere rappresentata da una mappa, da una tabella oppure da una figura (Fig. 2.23).

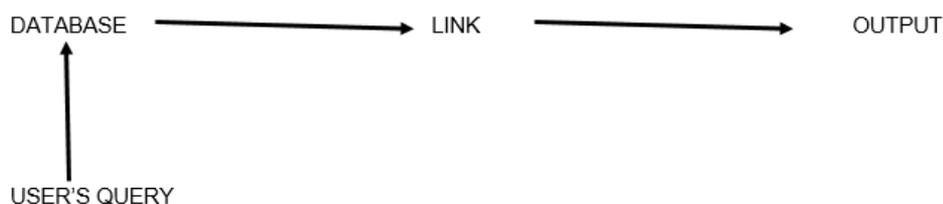


Fig. 2.23 Schematizzazione delle fasi di analisi in ambiente GIS a seguito di una query [Burrough, 1986].

I GIS rappresentano pertanto strumenti potenti che necessitano nel contempo di notevoli costi, la spesa non è da imputare all'acquisto degli hardware, software e nella formazione del personale, bensì al reperimento ed alla raccolta dei dati piuttosto che al loro processamento, ammesso che durante questa fase il 100% dei dati corrispondano alle specifiche del processo di input.

Uno schema di importazione cartografica teorica parte dal presupposto che tutti i dati importati siano esenti da errori; l'assenza di errori è riferita non solo alla mancanza di inesattezze oggettive dovute a falle nei dati, ma anche ad errori statistici.

In altre parole, l'operazione cartografica di aggiungere due o più differenti mappe insieme, attraverso una semplice operazione di sovrapposizione, implica che entrambi i dati sorgente siano esenti da errori, con livelli di qualità cartografica simili sull'area di interesse.

Sono numerosi gli studi (Mandelbrot, 1982; Mark et al., 1984; Baveye et al., 2017) che stanno affrontando il problema della variazione residua e di come gli errori possano sorgere, crearsi e propagarsi, e su come gli effetti di questi errori possano influire sui risultati degli studi fatti.

Quando è necessario lavorare con grandi e complesse mole di dati risulta particolarmente conveniente ricorrere ai metodi di classificazione, i GIS permettono,

infatti, di caricare tutti questi dati e decidere successivamente di ridurli e classificarli, prima che vengano utilizzati nelle operazioni di analisi.

La flessibilità della classificazione permette di operare su una specifica porzione del database, utilizzando l'appropriata combinazione di metodi di interpolazione e classificazione, permettendo all'utente GIS di estrarre un maggior numero di informazioni.

I tipi di modelli di interpolazione vengono generalmente suddivisi in due gruppi: deterministici e stocastici. I modelli di interpolazione deterministici definiscono il legame fra punti vicini espressi da una legge esplicita i cui parametri hanno significato fisico; mentre nei modelli di interpolazione stocastici il legame fra punti vicini è espresso da un legame statistico (definito covarianza) che può non avere significato fisico.

Esistono differenti metodi di interpolazione utilizzati per costruire un modello, gli stessi offrono, in base alle relative proprietà, vantaggi e svantaggi rispetto ad altri sistemi di interpolazione. Tendenzialmente la scelta del metodo deve essere dettata dalla proprietà, dalla distribuzione e dalla grandezza fisica dei dati a disposizione, non esiste quindi un algoritmo di interpolazione appropriato per tutte le applicazioni. L'interpolazione può essere effettuata globalmente o localmente, nel primo caso tutte le informazioni (valori) sono usate per costruire il modello e generalmente vengono utilizzate per individuare eventuali trend, nei secondi invece solo le informazioni (valori) dei punti vicini sono usate per costruire il modello.

I metodi di interpolazione locale sono, quindi, basati su modelli matematici utilizzati per consentire di trovare un modello plausibile per esprimere il fatto che punti vicini abbiano mediamente valori simili.

La gestione in ambiente GIS di nuvole di punti derivanti da acquisizioni laser scanner è un argomento relativamente recente. Sebbene questi strumenti vengono già utilizzati dagli anni 60' (Maiman, 1960), è solo nell'ultimo ventennio che il loro prodotto (nuvole di punti) sta ritagliandosi sempre più spazio nelle applicazioni GIS (Schwarz, 2010). Grazie all'evoluzione delle capacità di calcolo dei computer e degli aggiornamenti software è possibile gestire in un geodatabase dati di notevoli dimensioni, nell'ordine di diversi terabyte ed oltre.

Anche se in continua evoluzione persistono alcuni limiti che i sistemi GIS non riescono a gestire, oppure necessitano di passaggi su software terzi, prima di poter effettuare importazioni ed analisi di taluni dati. I sistemi di selezione dei GIS non permettono di isolare, in modo rapido, volumi complessi come pareti, colonne, capitelli e solai, partendo da una unica nuvola di punti. Molti GIS, infatti, compreso quello utilizzato nel presente lavoro (il Terraexplorer Pro della Skyline Software) permettono di selezionare le nuvole di punti solo secondo dei piani bidimensionali oppure tramite una selezione puntuale.

Essendo uno degli obiettivi del presente lavoro, l'interpolazione di dati nelle tre dimensioni, diventa rilevante poter utilizzare strumenti che consentono di selezionare porzioni di volume complessi. A tale scopo è stato utilizzato il software Pointools V8i della Bentley, per poter isolare ed analizzare qualsiasi porzione della nuvola di punti disponibile per Hagia Sophia. Il software ha tra i propri punti di forza la possibilità di selezionare nuvole di punti racchiuse all'interno di un cubo o di un cilindro con dimensioni personalizzabili, in questo modo diventa abbastanza agevole selezionare dei volumi specifici ed esportarli separatamente (Fig. 2.24).

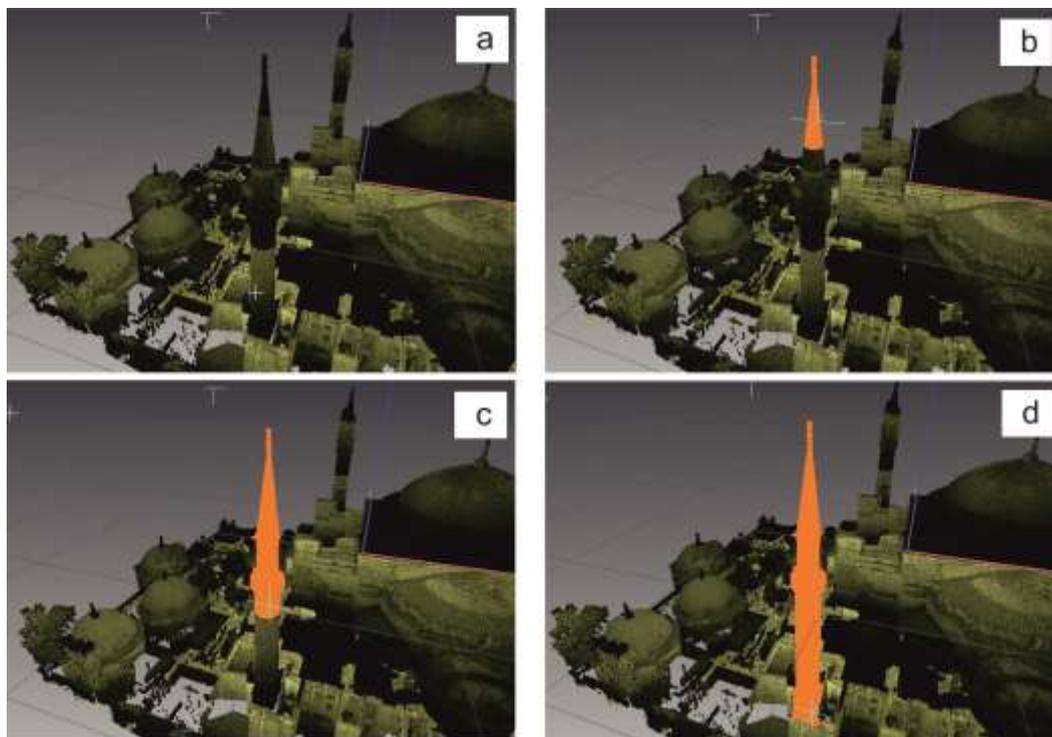


Fig. 2.24 Selezione cilindrica di un minareto di Hagia Sophia, tramite software Pointools V8i della Bentley.

Negli anni, innumerevoli studi hanno interessato Hagia Sophia, alcuni di questi inerenti la realizzazione di planimetrie a diverse angolazioni dell'edificio stesso.

In questo lavoro, sfruttando i moderni software di restituzione 3D, si è cercato di realizzare il primo modello tridimensionale basato su planimetrie storiche dell'esterno di Hagia Sophia, in modo da arricchire il sistema GIS3D con un modello storico di riferimento su cui poter effettuare eventuali studi sull'evoluzione dell'edificio stesso. Questo modello è stato realizzato sfruttando la potenzialità delle NURB (Non-Uniform Rational B-Splines) (Altmann, 2002), si tratta di rappresentazioni matematiche della geometria 3D che permettono di definire accuratamente qualsiasi forma geometrica nota (linee, archi, cerchi) e qualsiasi forma irregolare realizzata a mano libera.

Il software NURBS utilizzato per la ricostruzione è il software Rhino, prodotto dalla società Rhinoceros, scelto poiché in grado di creare, modificare, analizzare, e tradurre curve, superfici, solidi, nuvole di punti e mesh poligonali NURBS.

Particolare attenzione, nella realizzazione del modello tridimensionale storico di Hagia Sophia, è stata dedicata alla vestizione grafica, attraverso l'applicazione di apposite "texture" sulle superfici tridimensionali.

Una immagine catturata e processata tecnicamente in modo da esser posizionata su una qualsiasi superficie poligonale, subisce il processo noto come Polynomial Texture Mapping (conosciuta anche con il suo acronimo di PTM oppure come texture) (Earl et al., 2010). In accordo con la tipologia di dati a disposizione, esistono due procedure per applicare un'immagine su un corrispondente modello 3D:

- **Usando dei punti di riferimento:** con questa procedura vengono identificati dei punti omologhi sull'immagine e sulla superficie poligonale; attraverso dei semplici clic viene associata all'immagine la terna di coordinate spaziali (x, y, z) del corrispondente modello 3D. L'operazione di ricoprimento dell'immagine sul modello 3D è possibile solo dopo che un numero sufficiente di punti è selezionato sulle due superfici (normalmente da 3 a 5 punti).
- **Usando i parametri di calibrazione ed orientamento di una macchina fotografica:** è possibile inserire a priori i parametri fotografici del sensore della macchina fotografica (dimensione in pixel, lunghezza focale e distorsione della

lente), oltre all'angolazione rispetto ad una terna cartesiana (x, y, z) , che permetta di automatizzare il processo di texture.

Nel nostro caso è stata seguita la prima procedura per applicare dei punti omologhi sull'immagine e sulla superficie poligonale, utilizzando il software 3DReshaper della società Hexagon, scelto per la sua versatilità nella gestione dei dati da differenti formati e di notevoli dimensioni.

Le interpolazioni nello spazio tridimensionale sono state anch'esse effettuate tramite un software esterno e sono state successivamente importate all'interno del sistema GIS3D che ne permette la visualizzazione in un ambiente georiferito, oltre che a consentirne delle interazioni tramite specifiche operazioni di interrogazione (query). L'approccio metodologico è stato quello di studiare, con funzioni proprie, i valori di talune grandezze fisiche. Conoscendo, oppure ipotizzando di conoscere, i valori di una grandezza V su una superficie 3D regolare, è stato possibile visualizzare e/o interpolare V su superfici generiche S (Fig. 2.25).

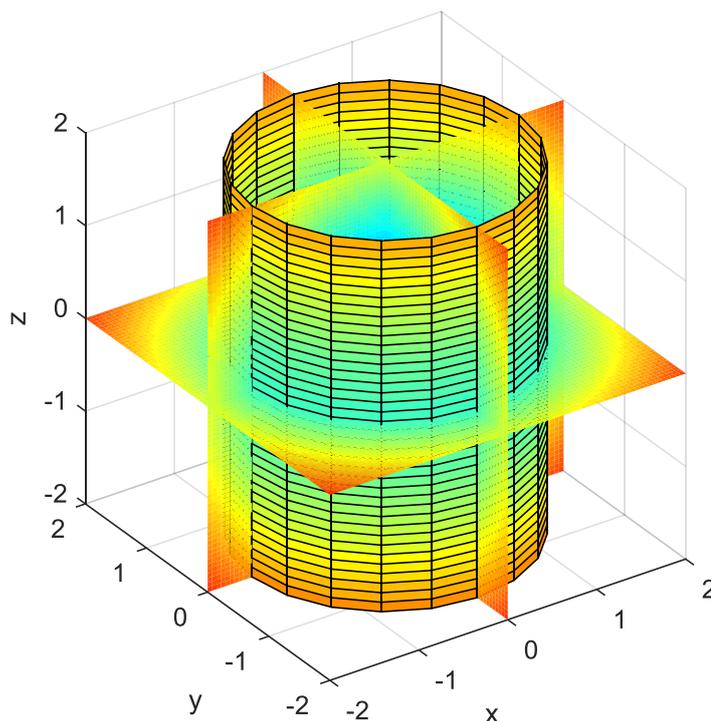


Fig. 2.25 Interpolazione su una superficie S (cilindrica), sulla quale si vuole conoscere il valore di V .

Il processo rappresentato può essere schematizzato nei seguenti 3 passaggi:

1. creazione di una griglia S che rappresenta la superficie 3D sulla quale si vuole conoscere V ;
2. interpolazione dei valori di V dai punti su cui è inizialmente nota (ad esempio una griglia regolare) ai punti della griglia S ;
3. visualizzazione di V sulla superficie S

Il software utilizzato per le interpolazioni tridimensionali sulle porzioni di Hagia Sophia è rappresentato da Matlab della società Mathworks.

CAPITOLO 3

RISULTATI DELLE ANALISI COMPOSIZIONALI

3.1 Analisi macroscopica dei campioni

Uno degli scopi di questo lavoro è l'implementazione della piattaforma GIS 3D di Hagia Sophia e l'integrazione della stessa con nuovi dati derivanti dallo studio compositivo di alcuni frammenti di laterizio campionati sull'edificio. A tale proposito sono stati utilizzati 29 frammenti di laterizio che non erano stati analizzati in precedenza, campionati durante un precedente progetto di ricerca (Cura, 2016).

Il dettaglio dei 29 campioni, la loro ubicazione e la probabile datazione della messa in posa dei laterizi è riportata nel capitolo 2 (vedi paragrafo 2.1), mentre le caratteristiche macroscopiche dei campioni quali: colore Munsell, atmosfera di cottura, dimensioni dei non-plastic inclusions (NPI), presenza e dimensione dei vacuoli ed eventuali note aggiuntive, sono riportate in Tabella 3.1.

Campione	Colore Munsell	Atmosfera di cottura	Dimensioni non plastic inclusions (NPI)	Vacuoli	Range dimensionale dei vacuoli	Note
BAS1	2.5YR6/8	Ossidante	Inferiori ad 1 mm	Osservabili ad occhio nudo	Inferiore ad 1 mm	L'addensamento dei NPI è disomogeneo
BAS2	2.5YR5/6	Ossidante	Variabili da 1 mm a poco più di 2 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a dimensioni prossime ai 3 mm	L'addensamento dei NPI è disomogeneo
BAS3	10R4/8	Ossidante	Variabili da meno di 1 mm a circa 5 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a dimensioni prossime ai 3 mm	–
BAS4	2.5YR5/8	Ossidante	Variabili da meno di 1 mm a circa 2 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a dimensioni prossime ai 2.5 mm	–
BAS5	10YR6/4	Ossidante	Intorno ad 1 mm	Osservabili ad occhio nudo	Inferiori a 0.5 mm	Colorazione disomogenea
BAS6	10YR5/6	Ossidante	Variabili da meno di 1 mm a circa 2 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a dimensioni superiori ai 10 mm	Colorazione disomogenea

Tabella 3.1_I. Descrizione macroscopica dei campioni. NPI: non-plastic inclusions.

Campione	Colore Munsell	Atmosfera di cottura	Dimensioni non plastic inclusions (NPI)	Vacuoli	Range dimensionale dei vacuoli	Note
BAS7	10YR7/6	Ossidante	Variabili da meno di 1 mm a circa 6 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a dimensioni superiori ai 6 mm	Colorazione disomogenea
BAS8	2.5YR6/8	Ossidante	Variabili da meno di 1 mm a circa 2 mm	Osservabili ad occhio nudo	Inferiori a 1.5 mm	Colorazione disomogenea
BAS9	5YR6/6	Ossidante	Variabili da meno di 1 mm a circa 2 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a dimensioni superiori ai 3 mm	-
BAS10	2.5YR6/6	Ossidante	Variabili da meno di 1 mm a circa 2 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a dimensioni superiori ai 2 mm	Colorazione disomogenea
BAS11	10R5/8	Ossidante	Intorno ad 1 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a dimensioni superiori ai 2 mm	Colorazione disomogenea
BAS12	2.5YR5/6	Ossidante	Intorno ad 1 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a dimensioni inferiori ai 2 mm	Bioclasti
BAS13	2.5YR6/6	Ossidante	Variabili da meno di 1 mm a circa 4 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a dimensioni massime di circa 3	-
BAS14	5YR6/6	Ossidante	Intorno ad 1 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a dimensioni massime di circa 4	-
BAS15	2.5YR5/6	Ossidante	Variabili da meno di 1 mm a circa 2 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a dimensioni massime di circa 2	Colorazione disomogenea
BAS16	10R4/6	Ossidante	Intorno ad 1 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a dimensioni massime di circa 5	Colorazione disomogenea
BAS17	10R5/8	Ossidante	Intorno ad 1 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a dimensioni massime di circa 2	Colorazione e addensamento disomogenei
BAS18	2.5YR5/8	Ossidante	Intorno ad 1 mm	Osservabili ad occhio nudo	Di dimensioni medie intorno ad 1 mm	Colorazione disomogenea
BAS19	10R5/8	Ossidante	Intorno ad 1 mm	Osservabili ad occhio nudo	Di dimensioni medie intorno ad 1 mm	-
BAS20	2.5YR3/6	Ossidante	Variabili da meno di 1 mm a circa 2 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a poco più di 2 mm	-
BAS21	2.5YR4/8	Ossidante	Intorno ad 1 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a poco più di 2 mm	-
BAS22	10R5/10	Ossidante	Intorno ad 1 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a circa 2 mm	-

Tabella 3.1_II. Descrizione macroscopica dei campioni. NPI: non-plastic inclusions.

Campione	Colore Munsell	Atmosfera di cottura	Dimensioni non plastic inclusions (NPI)	Vacuoli	Range dimensionale dei vacuoli	Note
BAS23	2.5YR6/6	Ossidante	Intorno ad 1 mm	Osservabili ad occhio nudo	Inferiori a 0.5 mm	–
BAS24	10R7/6	Ossidante	Intorno ad 1 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a circa 4 mm	–
BAS25	2.5YR5/6	Ossidante	Variabili da meno di 1 mm a circa 2 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a circa 1.5 mm	–
BAS26	2.5YR5/6	Ossidante	Variabili da meno di 1 mm a circa 2 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a circa 2.5 mm	–
BAS27	5YR7/6	Ossidante	Inferiori ad 1 mm	Osservabili ad occhio nudo	Di dimensioni inferiori a 1 mm	–
BAS28	2.5YR7/4	Ossidante	Inferiori ad 1 mm	Osservabili ad occhio nudo	Di dimensioni medie intorno ad 1 mm	–
BAS29	2.5YR6/6	Ossidante	Inferiori ad 1 mm	Osservabili ad occhio nudo	Da meno di 1 mm a poco meno di 3 mm	–

Tabella 3.1_III. Descrizione macroscopica dei campioni. NPI: non-plastic inclusions.

Per tutti i campioni risulta osservabile un'atmosfera di cottura di tipo ossidante, la presenza di ossigeno in eccesso, infatti, determina la formazione di ossido ferrico (es: ematite) di colore rosso.

Alcuni campioni (BAS5, BAS6, BAS7, BAS8, BAS10, BAS11, BAS15, BAS16, BAS17 e BAS18) presentano una colorazione disomogenea, mentre nei campioni BAS1, BAS2 e BAS17 l'addensamento dei NPE risulta disomogeneo.

In tutti i campioni è stato possibile osservare macroscopicamente la presenza di vacuoli, mediamente di dimensioni millimetriche. Infine, in un solo campione, il BAS12, è stato possibile osservare anche la presenza di bioclasti.

3.2 Analisi petrografiche in sezione sottile

Lo studio in sezione sottile dei laterizi di Hagia Sophia, mediante microscopio ottico polarizzatore, ha permesso di determinare la loro composizione mineralogico-petrografica. I risultati delle analisi sono riassunti in Tabella 3.2, mentre le scansioni delle sezioni sottili con lo studio in dettaglio sono riportati nell'Appendice A.

	Analisi modale					Mediane XRPD e SEM-EDS		Sorting of non plastic inclusions (by Boggs 2010; Jerram 2001)	Isotropy of the matrix	Roundness (Powers 1953)	Sphericity (Powers 1953)	Chamotte	Altro			
	Mean non-plastic inclusions size (µm)	Max. non-plastic inclusions size (µm)	Wentworth size (Wentworth 1922)	% non-plastic inclusions (size>1/16 mm)	% Matrix (size<1/16 mm)	Matrix/non-plastic inclusions ratio	% Macroporosity (size>1/16 mm)							% Secondary calcite	Mineralogical phases of the non-plastic inclusions	Rock fragments
BAS1	67	693	Very Fine Sand	3.60	88.75	24.66	2.25	5.40	Qtz, Pl, Px, Cal, Hem, Ms, Bt, Om	Quartziti, Granitoidi	MWS	Low	sub-rounded	low sphericity	P	
BAS2	700	2400	Coarse sand	7.29	78.47	10.76	6.08	8.16	Qtz, Pl, Px, Bt, Ms, Hem, Cal, Om	Filladi, Quartziti, Trachi-Andesiti Basaltiche (in trace), Trachi-Andesiti (in trace), Daciti (in trace)	VWS	High	sub-rounded	low sphericity	P	
BAS3	580	5600	Coarse sand	18.22	75.03	4.12	5.73	1.02	Qtz, Pl, Or, Ms, Bt, Cal, Om	Quartziti, Granitoidi, Daciti (in trace)	MWS	High	rounded	low sphericity	P	
BAS4	200	2697	Medium Sand	22.57	66.93	2.97	4.39	6.11	Qtz, Pl, Or, Px, Cal, Hem, Ms, Bt, Om	Quartziti, Granitoidi, Filladi	PS	Low	angular	high sphericity	P	
BAS5	440	1220	Medium Sand	5.84	85.06	14.56	3.25	5.84	Qtz, Cal, Px, Pl, Or, Hem, Ms, Bt, Om	Quartziti, Granitoidi, Filladi	MWS	High	angular	high sphericity	A	
BAS6	49	1619	Coarse Silt	3.06	86.08	28.17	4.24	6.62	Qtz, Px, Pl, Or, Bt, Hem, Ms, Cal, Om	Quartziti, Filladi, Arenarie	WS	Medium	angular	high sphericity	A	

Tabella 3.2_I. Analisi petrografiche in sezione sottile. Fasi mineralogiche: Bt: biotite, Cal: calcite, Chl: clorite, Gp: gesso, Hem: ematite, Mc: microclino, Ms: muscovite, Om: minerali opachi, Or: ortoclasio, Pl: Plagioclasio, Qtz: quarzo, Px: pirosseno; Chamotte A: assente, P: presente.

	Analisi modale				Mediante XRPD e SEM-EDS			Sorting of non plastic inclusions (by Beggs 2010; Jerram 2001)	Isotropy of the matrix	Roundness (Powers 1953)	Sphericity (Powers 1953)	Chamotte	Altro			
	Mean non-plastic inclusions size (µm)	Max. non-plastic inclusions size (µm)	Wentworth size (Wentworth 1922)	% non-plastic inclusions (size> 1/16 mm)	% Matrix (size<1/16 mm)	Matrix/non-plastic inclusions ratio	% Macroporosity (size>1/16 mm)							% Secondary calcite	Mineralogical phases of the non-plastic inclusions	Rock fragments
BAS7	184	6000	Very Fine Sand	12.92	75.42	5.84	4.63	7.02	Qtz, Px, Pl, Cal, Or, Mc, Ms, Bt, Om	Quartzii, Filladi, Granitoidi	PS	Very Low	sub-angular	high sphericity	P	
BAS8	238	1303	Fine Sand	7.32	84.36	11.52	4.66	3.66	Qtz, Pl, Or, Px, Cal, Hem, Ms, Bt, Om	Quartzii, Trachi-Andesiti Basaltiche (in tracce)	PS	Medium	sub-angular	high sphericity	P	
BAS9	214	2240	Fine Sand	11.17	71.99	6.45	7.39	9.45	Qtz, Pl, Px, Or, Cal, Hem, Ms, Bt, Om	Quartzii, Granitoidi, Rioliti (in tracce)	MWS	Medium	sub-angular	high sphericity	A	
BAS10	630	2370	Coarse Sand	8.56	83.66	9.77	4.28	3.50	Qtz, Pl, Px, Hem, Ms, Cal, Om	Quartzii, Filladi, Laiti (in tracce), Rioliti (in tracce)	MS	Medium	sub-rounded	low sphericity	A	
BAS11	56	1259	Coarse Silt	8.39	76.13	9.08	5.81	9.68	Qtz, Px, Pl, Hem, Or, Ms, Cal, Om	Quartzii, Granitoidi, Calcareniti	WS	Medium	sub-rounded	low sphericity	P	
BAS12	355	1042	Medium Sand	16.79	69.47	4.14	3.56	10.18	Qtz, Pl, Cal, Px, Hem, Ms, Bt, Om	Quartzii, Filladi, Granitoidi, Laiti (in tracce)	MWS	Medium	sub-angular	high sphericity	P	Bioclasti (Tracce)

Tabella 3.2_II. Analisi petrografiche in sezione sottile. Fasi mineralogiche: Bt: biotite, Cal: calcite, Chl: clorite, Gp: gesso, Hem: ematite, Mc: microclino, Ms: muscovite, Om: minerali opachi, Or: ortoclasio, Pl: Plagioclasio, Qtz: quarzo, Px: pirosseno; Chamotte A: assente, P: presente.

	Analisi modale				Mediante XRPD e SEM-EDS			Isotropy of the matrix	Roundness (Powers 1953)	Sphericity (Powers 1953)	Chamotte	Altro				
	Mean non-plastic inclusions size (µm)	Max. non-plastic inclusions size (µm)	Wentworth size (Wentworth 1922)	% non-plastic inclusions (size>1/16 mm)	% Matrix (size<1/16 mm)	Matrix/non-plastic inclusions ratio	% Macroporosity (size>1/16 mm)						% Secondary calcite	Mineralogical phases of the non-plastic inclusions	Rock fragments	Sorting of non plastic inclusions (by Boggs 2010; Jerram 2001)
BAS13	274	4336	Medium Sand	14.51	73.28	5.05	4.23	7.98	Qtz, Pl, Px, Or, Cal, Hem, Om	Quarzi, Granitoidi, Trachitoidi (in tracce)	MWS	Medium	sub-angular	high sphericity	P	
BAS14	328	1141	Medium Sand	8.64	79.47	9.20	7.26	4.63	Qtz, Pl, Cal, Ms, Bt, Om	Quarzi, Granitoidi, Trachitoidi (in tracce)	PS	Low	sub-angular	low sphericity	A	
BAS15	223	2222	Fine Sand	11.07	75.49	6.82	5.14	8.30	Qtz, Pl, Cal, Hem, Or, Om	Quarzi, Rioliti (in tracce)	WS	Medium	sub-rounded	high sphericity	P	
BAS16	362	1296	Medium Sand	8.10	76.32	9.42	9.35	6.23	Qtz, Cal, Pl, Px, Or, Hem, Bt, Om	Quarzi, Granitoidi, Rioliti (in tracce), Trachitoidi, Andesiti Basaltiche (in tracce), Trachiti (in tracce)	MS	Low	sub-angular	high sphericity	P	
BAS17	200	1362	Fine Sand	12.29	82.01	6.67	4.20	1.50	Qtz, Pl, Cal, Px, Hem, Ms, Bt, Or, Om	Quarzi, Granitoidi, Filladi	WS	High	sub-rounded	high sphericity	P	
BAS18	210	879	Fine Sand	7.21	85.89	11.91	5.96	0.94	Qtz, Cal, Pl, Ms, Bt, Hem, Om	Quarzi, Filladi, Granitoidi, Andesiti (in tracce), Benmoreiti (in tracce)	WS	Low	sub-angular	high sphericity	P	

Tabella 3.2_III. Analisi petrografiche in sezione sottile. Fasi mineralogiche: Bt: biotite, Cal: calcite, Chl: clorite, Gp: gesso, Hem: ematite, Mc: microclino, Ms: muscovite, Om: minerali opachi, Or: ortoclasio, Pl: Plagioclasio, Qtz: quarzo, Px: pirosseno; Chamotte A: assente, P: presente.

	Analisi modale					Mediante XRPD e SEM-EDS		Isotropy of the matrix	Roundness (Powers 1953)	Sphericity (Powers 1953)	Chamotte	Altro				
	Mean non-plastic inclusions size (µm)	Max. non-plastic inclusions size (µm)	Wentworth size (Wentworth 1922)	% non-plastic inclusions (size>1/16 mm)	% Matrix (size<1/16 mm)	Matrix/non-plastic inclusions ratio	% Macroporosity (size>1/16 mm)						% Secondary calcite	Mineralogical phases of the non-plastic inclusions	Rock fragments	Sorting of non plastic inclusions (by Beggs 2010, Jerram 2001)
BAS19	270	1277	Medium Sand	27.35	62.82	2.30	7.48	2.35	Qtz, Pl, Cal, Hem, Px, Ms, Bt, Om	Granitoidi, Quarziti, Filladi	PS	High	sub-rounded	low sphericity	P	
BAS20	260	1864	Medium Sand	14.72	77.59	5.27	6.76	0.93	Qtz, Pl, Or, Ms, Px, Cal, Om	Granitoidi, Quarziti, Filladi	VVS	Medium	sub-angular	high sphericity	P	
BAS21	123	2271	Very Fine Sand	5.09	89.06	17.48	4.91	0.94	Qtz, Pl, Or, Px, Hem, Bt, Ms, Cal, Om	Qurziti, Filladi, Trachi-Andesiti (in tracce), Daciti (in tracce)	MWS	Medium	angular	high sphericity	P	
BAS22	387	1715	Medium Sand	6.34	87.97	13.87	3.90	1.79	Qtz, Or, Pl, Px, Hem, Ms, Om, Cal	Quarziti, Granitoidi, Trachi-Basalti (in tracce), Latiti (in tracce)	PS	Medium	sub-angular	low sphericity	P	
BAS23	123	901	Very Fine Sand	10.20	81.63	8.00	0.00	8.16	Qtz, Pl, Px, Or, Hem, Cal, Om	Filladi, Quarziti	MWS	Medium	sub-rounded	low sphericity	A	
BAS24	464	1141	Medium Sand	6.46	86.69	13.42	4.11	2.74	Qtz, Pl, Px, Or, Cal, Hem, Ms, Bt, Om	Filladi, Trachi-Andesiti (in tracce), Trachiti (in tracce)	WS	Low	sub-rounded	high sphericity	P	

Tabella 3.2_IV. Analisi petrografiche in sezione sottile. Fasi mineralogiche: Bt: biotite, Cal: calcite, Chl: clorite, Gp: gesso, Hem: ematite, Mc: microclino, Ms: muscovite, Om: minerali opachi, Or: ortoclasio, Pl: Plagioclasio, Qtz: quarzo, Px: pirosseno; Chamotte A: assente, P: presente.

	Analisi modale				Mediane XRPD e SEM-EDS			Sorting of non plastic inclusions (by Boggs 2010; Jerram 2001)	Isotropy of the matrix	Roundness (Powers 1953)	Sphericity (Powers 1953)	Chamotte	Altro			
	Mean non-plastic inclusions size (µm)	Max. non-plastic inclusions size (µm)	Wentworth size (Wentworth 1922)	% non-plastic inclusions (size > 1/16 mm)	% Matrix (size < 1/16 mm)	Matrix/non-plastic inclusions ratio	% Macroporosity (size > 1/16 mm)							% Secondary calcite	Mineralogical phases of the non-plastic inclusions	Rock fragments
BAS25	86	1955	Very Fine Sand	15.81	74.42	4.71	6.28	3.49	Qtz, Cal, Pl, Or, Px, Hem, Ms, Om	Quartziti, Arenarie	WS	Low	sub-rounded	low sphericity	P	
BAS26	290	2225	Medium Sand	15.27	74.25	4.86	8.68	1.80	Qtz, Pl, Or, Px, Hem, Cal, Om,	Quartziti, Granitoidi, Filladi, Arenaria, Trachite (in tracce), Dacite (in tracce)	MWS	High	sub-rounded	low sphericity	P	
BAS27	260	694	Medium Sand	6.10	91.08	14.92	1.88	0.94	Qtz, Px, Pl, Or, Cal, Hem, Om	Quartziti	MWS	Low	sub-rounded	high sphericity	P	
BAS28	92	557	Very Fine Sand	10.87	78.26	7.20	8.70	2.17	Qtz, Pl, Hem, Chl, Gp, Om, Cal	Quartziti, Granitoidi	PS	High	sub-rounded	high sphericity	A	
BAS29	60	423	Coarse Silt	9.09	75.76	8.33	13.64	1.52	Qtz, Pl, Cal, Or, Hem, Ms, Px, Om	Quartziti, Granitoidi	WS	Low	sub-rounded	high sphericity	A	

Tabella 3.2_V. Analisi petrografiche in sezione sottile. Fasi mineralogiche: Bt: biotite, Cal: calcite, Chl: clorite, Gp: gesso, Hem: ematite, Mc: microclino, Ms: muscovite, Om: minerali opachi, Or: ortoclasio, Pl: Plagioclasio, Qtz: quarzo, Px: pirosseno; Chamotte A: assente, P: presente.

3.3 Analisi modale

Lo studio delle sezioni eseguito tramite l'analisi modale (Di Caprio, 2007) ha permesso di accertare il valore percentuale dei componenti della ceramica, effettuando una stima, più o meno precisa, dell'area occupata da ciascuno. L'analisi modale è stata eseguita al microscopio ottico polarizzatore mediante un "tavolino conta punti" costituito da un tavolino traslatore che si sposta di dimensioni prestabilite lungo un piano X-Y. Sono stati evidenziati per ogni campione i valori percentuali di: matrice, frammenti monomineralici, frammenti polimineralici, porosità, chamotte e calcite secondaria nei pori (Tabella 3.3).

	Matrice	Frammenti monomineralici	Frammenti polimineralici	Frammenti monomineralici + frammenti polimineralici	Porosità	Chamotte	Calcite secondaria
BAS1	88.75	2.70	0.56	3.26	2.25	0.34	5.40
BAS2	78.47	3.47	3.82	7.29	6.08	N.r.	8.16
BAS3	75.03	9.30	7.90	17.20	5.73	1.02	1.02
BAS4	66.93	4.08	6.90	10.97	4.39	11.60	6.11
BAS5	85.06	1.30	4.55	5.84	3.25	N.r.	5.84
BAS6	86.08	1.87	1.19	3.06	4.24	N.r.	6.62
BAS7	75.42	3.23	9.13	12.36	4.63	0.56	7.02
BAS8	84.36	2.50	3.99	6.49	4.66	0.83	3.66
BAS9	71.99	3.95	7.22	11.17	7.39	N.r.	9.45
BAS10	83.66	2.14	6.42	8.56	4.28	N.r.	3.50
BAS11	76.13	3.44	4.52	7.96	5.81	0.43	9.68
BAS12	69.47	3.05	13.23	16.28	3.56	0.51	10.18
BAS13	73.28	2.66	11.37	14.03	4.23	0.48	7.98
BAS14	79.47	1.63	6.01	7.63	7.26	1.00	4.63
BAS15	75.49	2.77	7.91	10.67	5.14	0.40	8.30
BAS16	76.32	2.49	5.30	7.79	9.35	0.31	6.23
BAS17	82.01	4.05	8.10	12.14	4.20	0.15	1.50
BAS18	85.89	0.31	5.96	6.27	5.96	0.94	0.94
BAS19	62.82	1.50	25.21	26.71	7.48	0.64	2.35
BAS20	77.59	2.25	12.07	14.32	6.76	0.40	0.93
BAS21	89.06	2.08	1.70	3.77	4.91	1.32	0.94
BAS22	87.97	1.46	4.55	6.02	3.90	0.33	1.79
BAS23	81.63	4.08	6.12	10.20	0.00	N.r.	8.16
BAS24	86.69	0.98	5.28	6.26	4.11	0.20	2.74
BAS25	74.42	3.72	6.98	10.70	6.28	5.12	3.49
BAS26	74.25	1.20	13.17	14.37	8.68	0.90	1.80
BAS27	91.08	1.88	3.76	5.63	1.88	0.47	0.94
BAS28	78.26	2.17	8.70	10.87	8.70	N.r.	2.17
BAS29	75.76	3.03	6.06	9.09	13.64	N.r.	1.52

Tabella 3.3. Analisi modale sui laterizi di Hagia Sophia (N.r.: non rilevata).

3.4 Analisi diffrattometriche (XRPD)

L'analisi mineralogica dei frammenti di laterizio, eseguita mediante diffrattometria a raggi X (XRPD) ha permesso di identificare le varie fasi mineralogiche presenti (Tabella 3.4). I diffrattogrammi relativi ad ogni campione sono riportati nell'Appendice B.

	Max. <-----> Min.						
BAS1	Qtz	Pl	Di	Cal	Hem		
BAS2	Qtz	Pl	Di	Hem	Cal		
BAS3	Qtz	Pl	Hem				
BAS4	Qtz	Pl	Or	Di	Cal	Mca	Hem
BAS5	Qtz	Cal	Di	Pl	Or	Hem	
BAS6	Qtz	Di	Pl	Or	Hem		
BAS7	Qtz	Di	Pl	Cal	Or		
BAS8	Qtz	Pl	Or	Di	Cal	Mca	Hem
BAS9	Qtz	Pl	Di	Or	Cal	Hem	
BAS10	Qtz	Di	Pl	Mca	Hem		
BAS11	Qtz	Di	Pl	Or	Ol	Hem	
BAS12	Qtz	Pl	Cal	Di	Mca	Hem	
BAS13	Qtz	Pl	Di	Or	Cal	Hem	
BAS14	Qtz	Pl	Cal	Di	Or	Mca	Hem
BAS15	Qtz	Pl	Cal	Hem	Or		
BAS16	Qtz	Cal	Pl	Di	Or	Hem	
BAS17	Qtz	Pl	Cal	Di	Or	Hem	
BAS18	Qtz	Cal	Pl	Hem	Mca		
BAS19	Qtz	Pl	Cal	Hem	Di		
BAS20	Qtz	Pl	Or	Mca	Di		
BAS21	Qtz	Pl	Or	Di	Hem		
BAS22	Qtz	Or	Pl	Di	Hem		
BAS23	Qtz	Pl	Di	Or	Hem		
BAS24	Qtz	Pl	Di	Or	Cal	Hem	
BAS25	Qtz	Cal	Pl	Or	Di	Hem	
BAS26	Qtz	Pl	Or	Di	Hem		
BAS27	Qtz	Di	Pl	Or	Cal	Hem	
BAS28	Qtz	Pl	Chl	Gp	Hem		
BAS29	Qtz	Pl	Cal	Or	Mca	Di	Hem

Tabella 3.4 Risultati delle analisi mineralogiche XRPD. I minerali sono in ordine di abbondanza decrescente da sinistra verso destra. Fasi mineralogiche: Cal: calcite, Chl: clorite, Di: diopside, Gp: gesso, Hem: ematite, Mca: mica, Ol: olivina, Or: ortoclasio, Pl: Plagioclasio, Qtz: quarzo.

I minerali identificati sono quarzo, il più abbondante in quasi tutti i campioni, seguito da plagioclasio, ortoclasio, calcite, pirosseni, ematite, miche e minerali opachi.

3.5 Analisi chimiche (XRF)

L'analisi di spettrometria di fluorescenza a raggi X (XRF) è stata eseguita per determinare la composizione chimica dei laterizi di Hagia Sophia. Tuttavia, a causa dell'esigua quantità di materiale a disposizione, per i campioni BAS23, BAS25, BAS28 e BAS29 non è stato possibile effettuare tale analisi. Osservando il contenuto degli elementi maggiori riportati in Tabella 3.5, è possibile notare che la variabilità maggiore si ha per la silice (SiO_2), l'ossido di calcio (CaO) e di alluminio (Al_2O_3).

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ T}$	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI
BAS1	49.63	0.86	16.94	10.02	0.18	5.98	10.41	1.53	2.20	0.09	2.16
BAS2	50.02	0.90	15.10	10.38	0.16	8.50	10.03	1.31	1.77	0.09	1.74
BAS3	64.17	1.44	17.36	8.63	0.17	2.44	1.37	1.65	1.64	0.08	1.05
BAS4	53.85	0.93	14.94	9.54	0.17	4.65	9.77	1.22	2.47	0.11	2.35
BAS5	49.56	0.74	12.89	8.79	0.16	4.25	15.05	1.34	1.62	0.11	5.49
BAS6	48.83	0.81	14.28	9.37	0.14	9.17	10.88	1.52	1.65	0.10	3.25
BAS7	51.37	0.66	12.37	8.39	0.16	4.93	15.90	1.45	1.13	0.07	3.57
BAS8	51.01	0.79	17.16	8.72	0.14	6.30	10.02	1.48	2.24	0.10	2.04
BAS9	54.25	0.83	13.49	8.91	0.14	7.60	9.82	1.25	1.49	0.10	2.12
BAS10	48.41	0.81	13.82	9.25	0.14	8.83	11.50	1.70	1.91	0.10	3.53
BAS11	54.23	0.91	15.10	9.36	0.16	7.74	8.25	1.08	1.72	0.09	1.36
BAS12	52.54	0.86	13.58	9.21	0.15	7.45	10.55	1.09	1.60	0.09	2.88
BAS13	54.01	0.82	13.75	8.84	0.14	7.47	10.08	1.13	1.51	0.10	2.15
BAS14	49.38	0.73	16.15	8.23	0.13	5.56	11.21	1.69	2.12	0.09	4.71
BAS15	51.10	0.81	14.41	8.89	0.16	6.08	10.78	1.64	1.60	0.11	4.42
BAS16	38.98	0.88	11.69	12.63	0.18	3.70	19.02	1.15	2.26	0.10	9.41
BAS17	55.40	0.86	19.96	7.51	0.14	2.99	4.83	1.18	3.27	0.08	3.78
BAS18	48.66	0.89	16.63	9.24	0.16	5.55	8.07	0.81	2.32	0.13	7.54
BAS19	62.00	1.05	15.43	7.70	0.13	3.15	5.41	1.49	1.93	0.14	1.57
BAS20	60.68	1.14	19.45	7.13	0.10	3.22	1.49	1.78	2.45	0.11	2.45
BAS21	51.75	1.06	18.36	9.99	0.16	6.45	5.14	0.80	2.53	0.13	3.63
BAS22	51.88	0.99	15.53	9.56	0.10	4.34	5.70	0.86	2.91	2.78	5.35
BAS24	50.68	0.80	16.24	9.04	0.15	5.66	10.73	1.44	2.07	0.09	3.10
BAS26	57.72	0.79	12.52	8.03	0.13	7.12	8.88	1.44	1.35	0.11	1.91
BAS27	49.62	0.81	13.70	9.54	0.15	8.65	12.48	1.13	1.57	0.10	2.25

Tabella 3.5 Concentrazione degli elementi maggiori ottenuti tramite analisi XRF, valori espressi in wt% (percentuale in peso).

Attraverso questa analisi è stato, inoltre, possibile identificare una parte degli elementi in tracce: nichel, cromo, vanadio, lantano, cerio, cobalto, bario, niobio, yttrio, stronzio, zirconio, rubidio (Tabella 3.6). La variabilità chimica maggiore per gli elementi in tracce si registra, in ordine decrescente, per il cromo (Cr), il nichel (Ni), lo stronzio (Sr), il bario (Ba), lo zirconio (Zr) e il vanadio (V).

	Ni	Cr	V	La	Ce	Co	Ba	Nb	Y	Sr	Zr	Rb
BAS1	276	345	136	19	24	39	287	15	29	314	83	105
BAS2	465	528	129	19	38	48	354	13	29	209	71	93
BAS3	86	171	119	22	97	29	419	13	30	73	202	69
BAS4	204	317	124	23	67	31	424	23	32	200	129	120
BAS5	122	274	132	22	47	29	403	33	29	231	98	87
BAS6	366	502	119	30	29	43	401	19	27	225	61	89
BAS7	151	259	119	19	42	29	344	22	30	276	53	77
BAS8	248	306	150	21	40	38	318	13	29	342	60	102
BAS9	330	483	130	19	37	37	271	12	27	240	65	79
BAS10	314	474	151	19	37	37	270	16	27	220	69	90
BAS11	402	521	143	19	36	39	313	12	31	139	70	88
BAS12	321	550	139	19	37	40	339	14	27	200	71	79
BAS13	349	522	137	19	36	34	242	12	28	191	58	81
BAS14	166	287	150	27	38	34	326	19	26	408	74	98
BAS15	211	407	127	19	44	37	365	18	28	359	93	82
BAS16	102	300	109	19	44	19	154	27	21	367	148	91
BAS17	106	212	115	38	51	27	600	37	37	133	142	150
BAS18	194	463	135	19	36	38	364	27	26	183	126	106
BAS19	119	209	122	28	67	25	406	16	31	110	146	90
BAS20	91	219	120	26	43	25	451	23	35	117	173	105
BAS21	299	447	152	19	50	45	361	23	24	154	123	120
BAS22	215	360	105	19	44	29	394	19	19	304	183	120
BAS24	211	286	177	21	51	33	299	13	26	358	71	98
BAS26	303	526	128	19	34	36	294	10	26	181	62	72
BAS27	401	509	139	27	24	44	330	15	29	202	48	84

Tabella 3.6 Concentrazione di una parte degli elementi in tracce dei campioni di laterizio ottenuta tramite analisi XRF, valori espressi in ppm (parti per milione).

3.6 Microanalisi SEM-EDS

La microanalisi a dispersione di energia (EDS) è stata utilizzata per analizzare la composizione chimica dell'argilla presente nei laterizi di Hagia Sophia. L'analisi è stata eseguita, in sezione sottile, su 3 aree omogenee (denominate con i suffissi W1, W2 e W3), rappresentative della matrice di ogni campione.

Ad un ingrandimento del microscopio pari a 40X sono state campionate delle aree di 600 μm^2 ciascuna. In Fig. 3.1 è riportato un esempio dell'analisi eseguita su 3 aree omogenee della matrice del campione BAS7, mentre i risultati delle analisi di tutte le aree sono riportati in Tabella 3.7.

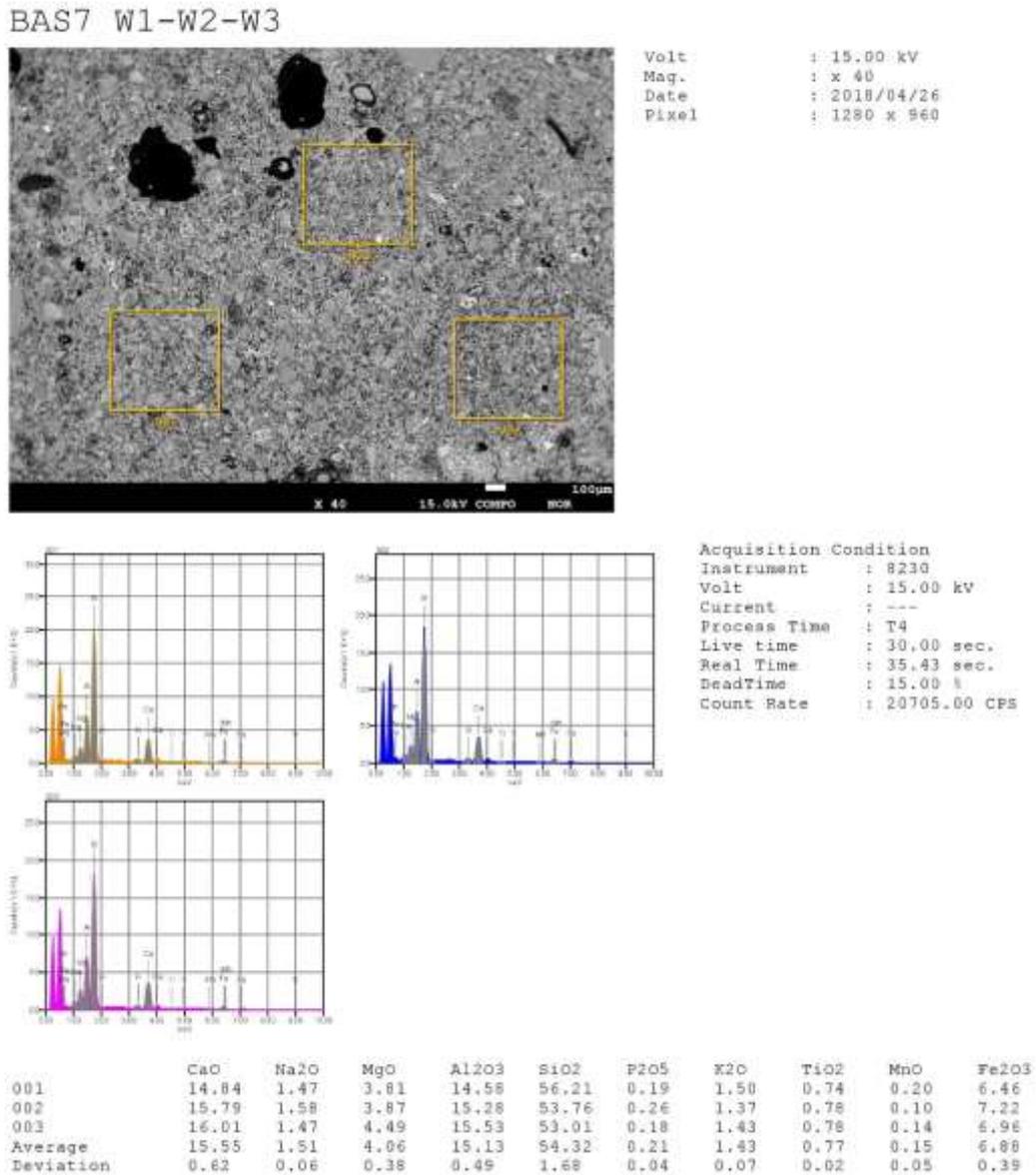


Fig. 3.1 Analisi EDS effettuata su 3 aree omogenee della matrice del campione BAS7.

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
BAS1_W1	53.47	0.63	19.81	7.13	0.26	4.62	8.68	1.96	2.96	0.34
BAS1_W2	53.74	0.78	20.01	7.45	0.13	4.62	8.36	1.82	2.92	0.23
BAS1_W3	53.02	0.93	19.89	7.52	0.21	4.57	8.74	1.95	2.88	0.24
BAS2_W1	54.15	0.82	17.03	8.18	0.15	6.84	7.93	1.62	2.52	0.26
BAS2_W2	55.50	0.78	16.74	8.10	0.09	6.52	7.91	1.36	2.18	0.32
BAS2_W3	54.05	0.78	17.06	8.33	0.31	7.05	8.72	1.43	2.08	0.19
BAS3_W1	69.87	1.30	16.19	4.92	0.11	1.43	0.42	3.64	1.85	0.27
BAS3_W2	71.09	1.28	15.17	4.99	0.11	1.35	0.69	3.38	1.66	0.29
BAS3_W3	72.99	0.86	14.21	5.48	0.14	1.56	0.47	2.29	1.59	0.40
BAS4_W1	60.81	0.87	15.70	6.48	0.02	3.15	7.87	2.39	2.55	0.17
BAS4_W2	58.92	0.66	15.47	6.61	0.13	3.41	10.10	1.74	2.54	0.41
BAS4_W3	58.86	0.67	15.56	6.51	0.12	3.83	9.92	1.92	2.34	0.26
BAS5_W1	53.45	0.85	17.75	8.02	0.25	5.95	9.10	2.44	1.96	0.22
BAS5_W2	55.78	0.67	18.82	7.08	0.35	4.51	8.00	2.34	2.14	0.30
BAS5_W3	54.69	0.94	18.48	7.08	0.24	5.11	8.05	2.37	2.78	0.26
BAS6_W1	54.72	0.86	17.57	8.40	0.20	6.86	6.76	1.84	2.58	0.20
BAS6_W2	54.99	0.94	17.53	8.10	0.41	6.91	6.58	1.77	2.54	0.22
BAS6_W3	54.49	0.94	17.63	8.35	0.28	6.95	6.67	1.77	2.71	0.20
BAS7_W1	56.21	0.74	14.58	6.46	0.20	3.81	14.84	1.47	1.50	0.19
BAS7_W2	53.76	0.78	15.28	7.22	0.10	3.87	15.79	1.58	1.37	0.26
BAS7_W3	53.01	0.78	15.53	6.96	0.14	4.49	16.01	1.47	1.43	0.18
BAS8_W1	55.23	0.89	17.37	6.86	0.26	4.86	9.72	1.75	2.82	0.24
BAS8_W2	53.47	0.79	18.97	7.42	0.27	4.78	9.21	1.79	3.06	0.24
BAS8_W3	55.27	0.83	17.65	7.24	0.09	4.59	9.89	1.77	2.68	0.00
BAS9_W1	56.19	0.79	16.49	7.88	0.18	6.09	8.59	1.50	2.04	0.24
BAS9_W2	55.30	0.88	16.71	8.14	0.27	6.16	8.90	1.50	1.97	0.18
BAS9_W3	57.95	0.73	15.90	7.58	0.04	5.66	8.43	1.43	2.01	0.27
BAS10_W1	51.38	0.75	15.85	7.45	0.21	7.13	13.14	1.68	2.17	0.24
BAS10_W2	53.33	0.79	15.36	7.54	0.18	6.48	11.71	1.91	2.42	0.27
BAS10_W3	50.46	0.97	15.92	7.95	0.23	7.26	12.88	1.84	2.26	0.23
BAS11_W1	56.43	1.09	17.36	8.33	0.20	6.53	5.96	1.36	2.42	0.31
BAS11_W2	57.80	0.89	16.65	8.41	0.26	6.33	5.47	1.41	2.56	0.23
BAS11_W3	56.86	0.79	17.20	8.36	0.31	6.48	5.93	1.37	2.52	0.17
BAS12_W1	55.76	1.45	15.59	7.54	0.20	6.06	9.94	1.44	1.86	0.16
BAS12_W2	57.99	0.78	15.38	7.22	0.22	5.85	8.72	1.67	2.06	0.11
BAS12_W3	58.14	0.89	15.24	7.60	0.34	5.86	8.08	1.66	1.94	0.25
BAS13_W1	57.85	0.70	15.54	7.44	0.25	6.07	8.30	1.46	2.13	0.27
BAS13_W2	58.04	0.84	15.42	7.05	0.16	5.73	8.85	1.54	2.09	0.29
BAS13_W3	60.72	0.66	14.44	6.64	0.05	5.58	8.41	1.36	1.91	0.23
BAS14_W1	54.62	0.92	19.39	6.82	0.07	4.74	8.68	1.71	2.82	0.23
BAS14_W2	54.47	0.88	19.15	7.19	0.26	4.69	8.55	1.70	2.77	0.34
BAS14_W3	54.01	0.76	19.53	7.09	0.31	4.74	8.56	1.83	2.98	0.19
BAS15_W1	56.16	0.70	18.03	7.37	0.11	5.32	7.40	2.11	2.67	0.12
BAS15_W2	55.24	0.87	18.01	7.75	0.14	5.58	7.65	2.00	2.40	0.35
BAS15_W3	56.39	0.89	17.49	7.40	0.16	5.44	7.99	1.83	2.20	0.22

Tabella 3.7_I Composizione chimica (espressa in percentuale in peso %wt) delle 3 aree omogenee analizzate per ogni laterizio.

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
BAS16_W1	53.86	0.89	18.14	6.86	0.25	4.37	10.50	2.20	2.72	0.21
BAS16_W2	53.79	0.87	18.31	7.07	0.07	4.60	10.39	2.00	2.57	0.32
BAS16_W3	53.87	0.68	18.06	6.89	0.24	4.40	10.71	1.96	2.82	0.37
BAS17_W1	59.56	0.88	22.75	6.67	0.14	1.61	2.26	1.55	4.42	0.17
BAS17_W2	61.03	0.72	22.07	6.38	0.24	1.55	1.93	1.44	4.27	0.36
BAS17_W3	61.10	0.69	21.81	6.21	0.23	1.52	1.91	1.59	4.64	0.29
BAS18_W1	55.41	0.76	17.90	7.35	0.26	4.21	9.30	1.26	3.20	0.33
BAS18_W2	56.08	0.93	17.43	8.08	0.08	4.31	8.55	1.19	3.13	0.22
BAS18_W3	55.97	0.65	16.33	6.79	0.30	3.72	11.83	1.29	2.83	0.29
BAS19_W1	70.87	0.92	14.52	5.58	0.10	1.87	1.67	2.24	1.87	0.36
BAS19_W2	68.13	0.60	16.32	6.34	0.14	2.06	1.21	2.77	2.16	0.28
BAS19_W3	67.65	0.94	16.06	5.02	0.14	1.82	2.53	3.17	2.38	0.28
BAS20_W1	61.92	1.09	19.64	7.85	0.25	2.35	0.58	2.57	3.53	0.23
BAS20_W2	64.41	1.35	18.41	6.98	0.17	2.14	0.45	2.56	3.30	0.24
BAS20_W3	63.37	1.14	19.15	7.33	0.06	2.27	0.51	2.46	3.39	0.32
BAS21_W1	56.76	0.96	19.16	7.57	0.27	4.50	5.78	1.58	2.99	0.44
BAS21_W2	56.34	0.68	19.34	7.46	0.18	4.69	6.14	1.70	3.11	0.35
BAS21_W3	57.13	0.98	18.98	7.38	0.28	4.47	5.82	1.75	2.95	0.26
BAS22_W1	53.15	0.94	18.08	7.93	0.09	3.82	6.82	0.91	3.03	5.22
BAS22_W2	53.42	0.83	18.21	7.73	0.28	3.84	6.59	0.98	3.18	4.93
BAS22_W3	53.70	0.77	17.92	7.70	0.10	3.71	7.03	1.03	2.95	5.10
BAS23_W1	51.98	0.81	15.84	8.11	0.30	7.64	11.04	1.76	2.32	0.21
BAS23_W2	52.16	0.74	16.11	8.04	0.17	7.61	10.76	1.84	2.28	0.29
BAS23_W3	58.30	0.91	14.24	7.19	0.19	6.29	9.37	1.34	1.88	0.28
BAS24_W1	54.17	0.79	19.18	7.43	0.17	4.53	9.24	1.53	2.71	0.25
BAS24_W2	54.21	0.82	18.89	7.23	0.18	4.61	9.58	1.58	2.67	0.25
BAS24_W3	54.75	0.68	19.13	7.22	0.27	4.64	8.87	1.51	2.75	0.18
BAS25_W1	54.13	0.71	16.64	5.80	0.78	3.97	13.60	1.51	2.60	0.26
BAS25_W2	55.70	0.70	16.68	5.74	0.21	3.78	12.46	1.49	2.83	0.41
BAS25_W3	55.29	0.88	16.65	6.08	0.12	3.91	12.64	1.55	2.60	0.27
BAS26_W1	55.33	0.80	16.55	7.63	0.24	6.39	8.80	1.78	2.22	0.27
BAS26_W2	56.85	0.81	15.47	6.97	0.17	6.08	9.56	1.63	2.05	0.41
BAS26_W3	56.39	0.68	15.94	7.38	0.19	6.00	9.25	1.61	2.08	0.47
BAS27_W1	53.76	0.74	15.14	7.34	0.14	6.7	12.83	1.4	1.95	0
BAS27_W2	53.30	0.90	15.83	7.80	0.19	6.73	11.16	1.65	2.21	0.23
BAS27_W3	51.88	0.93	15.69	8.18	0.24	6.81	12.47	1.44	2.00	0.36
BAS28_W1	65.16	0.79	18.38	6.55	0.16	2.36	0.73	2.80	2.60	0.47
BAS28_W2	67.82	0.85	16.67	6.17	0.18	2.07	1.06	2.60	2.05	0.53
BAS28_W3	65.64	1.14	17.79	6.59	0.23	2.36	0.88	2.68	2.29	0.42
BAS29_W1	67.85	0.76	16.72	6.08	0.25	1.90	0.91	2.52	2.52	0.49
BAS29_W2	64.94	1.10	17.68	7.04	0.12	2.31	1.18	2.43	2.65	0.55
BAS29_W3	65.24	1.48	17.51	6.87	0.13	2.20	0.98	2.52	2.51	0.56

Tabella 3.7_II Composizione chimica (espressa in percentuale in peso %wt) delle 3 aree omogenee analizzate per ogni laterizio.

Per poter confrontare i dati ottenuti e cercare di avvalorare l'ipotesi dell'utilizzo di argille di composizione diversa nelle differenti epoche costruttive, per ogni campione, è stato ricavato il valore medio degli elementi maggiori (Tabella 3.8).

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
BAS1_media	53.41	0.78	19.90	7.37	0.20	4.60	8.59	1.91	2.92	0.27
BAS2_media	54.57	0.79	16.94	8.20	0.18	6.80	8.19	1.47	2.26	0.26
BAS3_media	71.32	1.15	15.19	5.13	0.12	1.45	0.53	3.10	1.70	0.32
BAS4_media	59.53	0.73	15.58	6.53	0.09	3.46	9.30	2.02	2.48	0.28
BAS5_media	54.64	0.82	18.35	7.39	0.28	5.19	8.38	2.38	2.29	0.26
BAS6_media	54.73	0.91	17.58	8.28	0.30	6.91	6.67	1.79	2.61	0.21
BAS7_media	54.33	0.77	15.13	6.88	0.15	4.06	15.55	1.51	1.43	0.21
BAS8_media	54.66	0.84	18.00	7.17	0.21	4.74	9.61	1.77	2.85	0.16
BAS9_media	56.48	0.80	16.37	7.87	0.16	5.97	8.64	1.48	2.01	0.23
BAS10_media	51.72	0.84	15.71	7.65	0.21	6.96	12.58	1.81	2.28	0.25
BAS11_media	57.03	0.92	17.07	8.37	0.26	6.45	5.79	1.38	2.50	0.24
BAS12_media	57.30	1.04	15.40	7.45	0.25	5.92	8.91	1.59	1.95	0.17
BAS13_media	58.87	0.73	15.13	7.04	0.15	5.79	8.52	1.45	2.04	0.26
BAS14_media	54.37	0.85	19.36	7.03	0.21	4.72	8.60	1.75	2.86	0.25
BAS15_media	55.93	0.82	17.84	7.51	0.14	5.45	7.68	1.98	2.42	0.23
BAS16_media	53.84	0.81	18.17	6.94	0.19	4.46	10.53	2.05	2.70	0.30
BAS17_media	60.56	0.76	22.21	6.42	0.20	1.56	2.03	1.53	4.44	0.27
BAS18_media	55.82	0.78	17.22	7.41	0.21	4.08	9.89	1.25	3.05	0.28
BAS19_media	68.88	0.82	15.63	5.65	0.13	1.92	1.80	2.73	2.14	0.31
BAS20_media	63.23	1.19	19.07	7.39	0.16	2.25	0.51	2.53	3.41	0.26
BAS21_media	56.74	0.87	19.16	7.47	0.24	4.55	5.91	1.68	3.02	0.35
BAS22_media	53.42	0.85	18.07	7.79	0.16	3.79	6.81	0.97	3.05	5.08
BAS23_media	54.15	0.82	15.40	7.78	0.22	7.18	10.39	1.65	2.16	0.26
BAS24_media	54.38	0.76	19.07	7.29	0.21	4.59	9.23	1.54	2.71	0.23
BAS25_media	55.04	0.76	16.66	5.87	0.37	3.89	12.90	1.52	2.68	0.31
BAS26_media	56.19	0.76	15.99	7.33	0.20	6.16	9.20	1.67	2.12	0.38
BAS27_media	52.98	0.86	15.55	7.77	0.19	6.75	12.15	1.50	2.05	0.20
BAS28_media	66.21	0.93	17.61	6.44	0.19	2.26	0.89	2.69	2.31	0.47
BAS29_media	66.01	1.11	17.30	6.66	0.17	2.14	1.02	2.49	2.56	0.53

Tabella 3.8 Valori medi degli elementi maggiori delle 3 aree omogenee analizzate per ogni laterizio.

La microanalisi in dispersione di energia è stata, inoltre, utilizzata per lo studio di frammenti di roccia non ben identificabili in sezione sottile durante l'analisi in microscopia ottica. I frammenti di roccia analizzati sono stati distinti in due tipologie: rocce di origine vulcanica (vulcaniti) e rocce non di origine vulcanica.

Rientrano nella prima tipologia (vulcaniti) le rocce (seguite nella denominazione con V ed un numero crescente qualora ce ne siano più di una nella stessa sezione) dei campioni BAS2, BAS3, BAS8, BAS9, BAS10, BAS12, BAS13, BAS14, BAS15, BAS16, BAS18, BAS21, BAS22, BAS24 e BAS26 (Tabella 3.9).

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Classificazione Petrografica
BAS2_V1	51.56	1.62	22.85	8.07	0.23	1.02	6.16	3.76	4.49	0.23	Trachi-andesite basaltica
BAS2_V2	56.79	0.00	22.03	4.55	0.00	2.43	5.62	4.81	3.78	0.00	Trachi-andesite
BAS2_V3	69.31	0.67	14.23	4.03	0.04	1.11	3.38	3.11	3.80	0.32	Dacite
BAS3_V1	66.49	0.60	12.06	12.35	3.32	0.57	0.43	2.74	1.11	0.33	Dacite
BAS3_V2	68.45	0.91	15.20	5.45	4.63	0.90	0.66	1.98	1.58	0.23	Dacite
BAS8_V1	52.35	1.32	17.98	10.71	0.14	3.13	8.33	3.85	1.52	0.67	Trachi-andesite basaltica
BAS9_V1	71.57	1.02	13.72	3.21	0.02	0.58	1.91	3.24	4.61	0.13	Riolite
BAS10_V1	59.96	0.96	19.25	5.37	0.09	0.46	3.80	4.50	5.27	0.36	Latite
BAS10_V2	72.08	0.38	14.20	2.66	0.04	0.45	2.25	3.71	4.24	0.00	Riolite
BAS12_V1	58.98	3.70	15.92	8.48	0.07	2.06	0.50	5.63	4.58	0.08	Latite
BAS13_V1	60.31	1.61	14.95	7.23	0.32	6.01	1.28	4.66	3.02	0.61	Trachi-andesite
BAS14_V1	50.72	1.59	16.70	13.16	0.28	5.77	5.63	3.65	1.86	0.64	Trachi-basalto
BAS15_V2	70.54	0.91	14.49	2.55	0.06	0.42	3.70	2.57	4.29	0.47	Riolite
BAS16_V1	51.42	0.74	17.91	15.58	0.10	0.45	5.91	4.18	3.35	0.37	Trachi-andesite basaltica
BAS16_V2	66.44	1.40	17.55	1.58	0.06	0.51	3.73	3.25	5.42	0.07	Trachite
BAS18_V1	59.55	0.57	22.22	3.10	0.14	1.27	6.87	4.12	1.60	0.56	Andesite
BAS18_V2	62.68	0.44	21.23	2.42	0.11	0.98	3.15	4.61	4.20	0.17	Benmoreite
BAS21_V1	58.67	0.82	19.64	6.73	0.12	1.36	5.81	4.12	2.22	0.53	Trachi-andesite
BAS21_V2	67.43	0.86	17.66	2.02	0.14	0.48	4.01	4.32	2.72	0.36	Dacite
BAS21_V3	57.45	0.99	20.81	5.19	0.07	1.37	4.85	3.68	5.13	0.46	Trachi-andesite
BAS22_V1	50.05	0.73	21.69	6.60	0.00	4.82	5.04	3.17	3.02	4.89	Trachi-basalto
BAS22_V2	49.82	0.00	22.26	11.89	0.00	1.32	7.66	3.89	1.48	1.68	Trachi-basalto
BAS22_V3	62.21	0.28	19.69	4.15	0.07	1.23	2.45	3.97	5.47	0.49	Latite
BAS24_V1	60.55	1.13	20.26	3.59	0.06	0.69	6.07	3.87	3.32	0.46	Trachi-andesite
BAS24_V2	64.52	0.49	18.63	2.30	0.01	0.40	3.84	3.92	5.66	0.23	Trachite
BAS26_V1	67.02	1.14	17.30	2.08	0.11	0.40	5.67	3.35	2.13	0.81	Dacite
BAS26_V2_1	65.10	0.17	18.55	3.48	0.06	0.30	1.72	7.23	3.15	0.24	Trachite

Tabella 3.9. Composizione chimica (espressa in percentuale in peso) delle vulcaniti presenti in alcuni laterizi.

La classificazione geologica delle rocce vulcaniche riportate in Tabella 3.9 è stata effettuata attraverso il diagramma TAS (Total Alkali – Silica diagram) (Le Maitre et al., 2002) riportato in Fig. 3.2.

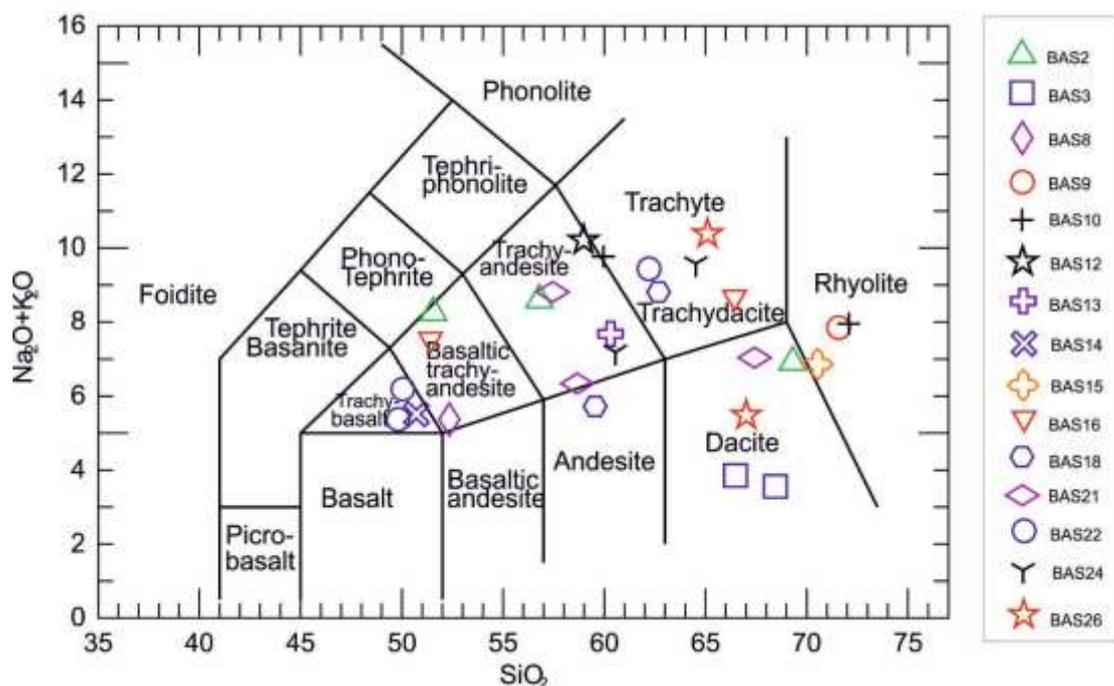


Fig. 3.2. Diagramma TAS delle vulcaniti presenti all'interno di alcuni campioni di laterizio.

Per quanto riguarda le altre rocce, la microanalisi EDS ha contribuito ad identificarle, combinando i dati della composizione chimica con le caratteristiche microscopiche osservate in sezione sottile (Tabella 3.10).

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Classificazione Petrografica
BAS1_R1	59.02	0.86	15.34	11.80	0.18	1.30	4.01	4.22	2.86	0.41	Roccia Sedimentaria
BAS5_V1	47.71	0.31	13.36	26.51	0.57	3.08	2.50	2.33	3.51	0.12	Roccia Sedimentaria
BAS6_V1	68.86	0.54	11.90	6.67	0.00	5.07	1.13	1.16	4.67	0.00	Arenaria
BAS7_V1	55.79	0.61	22.44	7.48	0.24	1.98	3.25	3.44	4.71	0.05	Roccia Sedimentaria
BAS11_R1	34.30	0.40	6.36	2.92	0.28	5.54	49.25	0.33	0.32	0.30	Calcarenite
BAS12_R1	89.00	0.13	4.47	2.32	0.08	0.53	0.65	0.86	1.71	0.26	Quarzite
BAS23_C1	74.94	0.30	8.71	7.17	0.15	3.23	0.30	0.99	4.21	0.00	Metamorfito
BAS26_R1	22.90	0.00	2.37	4.43	0.00	15.53	54.77	0.00	0.00	0.00	Calcarenite

Tabella 3.10. Composizione chimica (espressa in percentuale in peso) dei frammenti roccia presenti in alcuni laterizi.

Tali rocce sono state riscontrate nei campioni BAS1, BAS5, BAS6, BAS7, BAS11, BAS12, BAS23 e BAS26 e sono state chiamate aggiungendo suffissi differenti: è stata utilizzata la C se identificate come Carbone, R se identificate come roccia non vulcanica.

3.7 Analisi termiche (DSC-TG)

Per consentire di determinare le variazioni in peso dei laterizi di Hagia Sophia in funzione della temperatura, è stata eseguita sui 29 campioni l'analisi termica TGA (Thermogravimetric Analysis) e DSC (Differential Scanning Calorimetry).

I termogravigrammi ottenuti (vedi Appendice C) hanno permesso di ricavare informazioni sulle reazioni endotermiche ed esotermiche che si sviluppano nel campione. Per tutti i laterizi sono state registrate le percentuali di perdita in peso nei seguenti intervalli di temperatura (Fig. 3.3):

- < 120 °C
- 120-200 °C
- 200-400 °C
- 400-600 °C
- 600-650 °C
- >650 °C

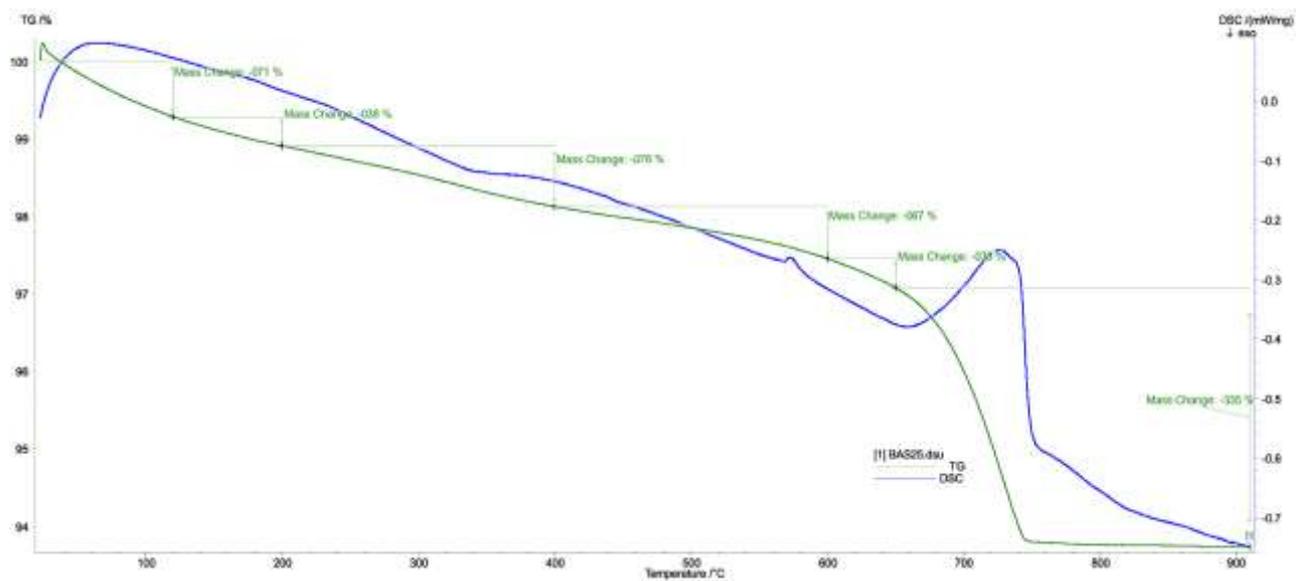


Fig. 3.3. Esempio di termogravigramma (campione BAS25) con i vari intervalli di temperatura utilizzati per misurare le percentuali di perdita in peso.

Mediante l'analisi termica TGA, sono stati inoltre ricavati la perdita in peso totale, la CO₂, l'acqua strutturale ed il rapporto CO₂/acqua strutturale. I valori sono riportati in Tabella 3.11.

	Perdita in Peso T<120 °C	Perdita in peso 120<T<200 °C	Perdita in peso 200<T<400 °C	Perdita in peso 400<T<600 °C	Perdita in peso 600<T<650 °C	Perdita in peso T>650 °C	Perdita in peso Total 30<T<920 °C	CO ₂	Acqua strutturale	CO ₂ /Acqua strutturale
BAS1	0.36	0.24	0.44	0.40	0.29	0.76	2.49	1.26	0.87	1.45
BAS2	0.18	0.14	0.28	0.24	0.17	0.63	1.64	0.85	0.61	1.39
BAS3	0.08	0.12	0.41	0.15	0.14	0.10	1.00	0.25	0.67	0.37
BAS4	0.18	0.12	0.31	0.20	0.16	0.78	1.75	0.97	0.60	1.62
BAS5	0.49	0.31	0.61	0.54	0.33	3.19	5.47	3.68	1.30	2.83
BAS6	0.37	0.31	0.53	0.79	0.36	0.37	2.73	0.81	1.55	0.52
BAS7	0.34	0.19	0.39	0.28	0.21	2.10	3.51	2.37	0.80	2.96
BAS8	0.26	0.14	0.29	0.27	0.30	0.78	2.04	1.06	0.72	1.47
BAS9	0.24	0.14	0.30	0.27	0.19	1.19	2.33	1.34	0.75	1.79
BAS10	0.53	0.28	0.77	0.91	0.25	0.94	3.68	0.48	2.67	0.18
BAS11	0.11	0.10	0.34	0.23	0.20	0.29	1.27	0.49	0.67	0.73
BAS12	0.26	0.14	0.33	0.36	0.25	1.20	2.54	1.44	0.84	1.71
BAS13	0.29	0.19	0.49	0.28	0.17	0.67	2.09	0.90	0.90	1.00
BAS14	0.41	0.22	0.44	0.68	0.38	2.27	4.40	2.71	1.28	2.12
BAS15	0.27	0.17	0.45	0.37	0.20	2.67	4.13	2.80	1.06	2.64
BAS16	1.30	0.51	1.34	2.20	0.95	3.69	9.99	3.79	4.90	0.77
BAS17	0.47	0.39	0.80	0.40	0.24	1.49	3.79	1.66	1.66	1.00
BAS18	1.29	0.80	0.97	0.81	0.36	3.16	7.39	3.50	2.60	1.35
BAS19	0.31	0.21	0.55	0.31	0.17	1.39	2.94	1.60	1.03	1.55
BAS20	1.05	0.32	0.44	0.53	0.32	0.43	3.09	0.72	1.32	0.55
BAS21	2.42	0.80	1.25	0.76	0.05	0.19	5.47	0.77	2.28	0.34
BAS22	2.85	1.88	1.50	0.53	0.11	0.20	7.07	0.29	3.93	0.07
BAS23	0.14	0.13	0.42	0.27	0.17	1.15	2.28	1.37	0.77	1.78
BAS24	0.30	0.23	0.44	0.63	0.26	0.65	2.51	1.38	0.83	1.66
BAS25	0.71	0.38	0.78	0.67	0.38	3.35	6.27	4.00	1.56	2.56
BAS26	0.21	0.11	0.26	0.24	0.19	0.58	1.59	0.81	0.57	1.42
BAS27	0.18	0.16	0.27	0.21	0.18	0.72	1.72	0.95	0.59	1.61
BAS28	0.14	0.43	0.59	0.18	0.18	0.19	1.71	0.37	1.20	0.31
BAS29	0.34	0.46	1.60	1.15	0.43	2.16	6.14	3.05	2.75	1.11

Tabella 3.11 Risultati delle analisi termogravimetriche (TG). I valori rappresentano la percentuale di perdita in peso, rispetto al peso iniziale del campione tale e quale.

3.8 Analisi Raman

Per poter caratterizzare alcuni minerali non identificabili attraverso lo studio al microscopio ottico polarizzatore, è stata utilizzata la spettroscopia vibrazionale Raman.

Sono stati analizzati alcuni minerali presenti nei campioni BAS3, BAS4, BAS16 e BAS29. I minerali studiati ed identificati sono riportati in Tabella 3.12.

	Raman shift cm ⁻¹																Specie mineralogica	
BAS3	202	224	356	415	439	507	822	873	974	1010								Zircone
BAS4	171	232	279	430	456	507	526	569	605	694	890	916	984	1044	1065	1089		Epidoto
BAS16	1357	1591																Carbonio amorfo
BAS29	145	396	509	643														Anatasio
BAS29	236	446	610	799														Rutilo

Tabella 3.12 Analisi micro-Raman di alcuni minerali accessori presenti nei campioni di laterizio. L'identificazione dei minerali è stata eseguita confrontando gli spettri con quelli presenti nel database RRUFF.

CAPITOLO 4

DISCUSSIONE DEI DATI

4.1 Il sistema GIS 3D per Hagia Sophia

Il sistema GIS applicato all'edificio di Hagia Sophia è rivolto all'utilizzo di tecniche di interpolazione matematica su volumi da applicare ai Beni Culturali, realizzando quindi un sistema GIS con interpolazione tridimensionale (GIS3D).

Lo studio si propone di implementare dati spaziali, di tipo numerico derivanti da differenti tecniche di analisi diagnostiche, in modo da fornire, oltre che un modello di facile comprensione, un prototipo del manufatto su cui effettuare operazioni di misura ed interpolazione.

La realizzazione di un modello virtuale tridimensionale ad alta risoluzione di Hagia Sophia rappresenta uno dei punti cardine del presente lavoro, che si propone di creare una piattaforma unica per la gestione dei dati diagnostici del patrimonio culturale.

Il modello 3D di Hagia Sophia è stato ottenuto integrando i prospetti planimetrici e le immagini disponibili in bibliografia con i dati derivanti da un precedente progetto di ricerca avviato tra l'Università del Messico, il Museo di Hagia Sophia di Istanbul e il Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra (DiBEST) dell'Università della Calabria.

Utilizzando il rilievo fotografico e fotogrammetrico da drone, la nuvola di punti parziale realizzata tramite acquisizione Laser Scanner sempre dallo stesso gruppo, e le tavole di ricostruzione grafica di Robert L. Van Nice (Van Nice, 1965), si è cercato di realizzare il modello tridimensionale, alla base del sistema GIS del presente lavoro.

Trattandosi di rilievi differenti, creati utilizzando varie tecnologie che restituiscono formati di output diversi, si è preferito elaborare separatamente e con più software i vari dati, con l'intenzione di realizzare un formato comune che potesse poi esser ospitato su una piattaforma GIS.

I produttori e gli utilizzatori di dati prodotti da sistemi di Imaging tridimensionale (Höhne et al., 2012) tendono ad affidarsi a formati proprietari o ad hoc per archiviare e scambiare dati, ma negli ultimi anni si sta imponendo un formato di file pubblico per l'interscambio di dati costituiti da punti tridimensionali (definiti anche nuvole di punti) definito LAS. Sebbene sviluppato principalmente per interscambio di dati derivanti da acquisizioni Laser Scanner, il formato LAS è costituito da un sistema di compressione di file binari che non rimuove o modifica le classi e gli attributi dei punti inseriti.

4.1.1 Nuvola di Punti Laser Scanner

Il modello 3D è costituito da un insieme di punti a cui sono associate tre coordinate spaziali (X, Y, Z), dei valori che rappresentano la cromaticità in R, G e B ed un valore associato alla riflettanza (i). Lo stesso è stato realizzato nel periodo di aprile 2013 ed aprile 2014 (Cura, 2016), con l'impiego di un Laser Scanner della Leica Geosystem modello "HDS ScanStation 2" ad impulsi ad alta velocità, con compensatore bi-assiale integrato, una velocità di scansione massima istantanea fino a 50.000 punti/sec, con possibilità di aumentare l'accuratezza della misurazione in base alla distanza degli elementi. La tecnologia di questo Laser Scanner 3D è il TOF (Time of Flight). Tale tecnologia consente, mediante l'intervallo di tempo trascorso, di misurare la distanza tra lo strumento ed un punto. I Laser Scanner sono dispositivi capaci di emettere un impulso elettromagnetico e di ricevere il segnale riflesso, misurando l'intervallo di tempo trascorso e quindi la distanza tra lo strumento ed il punto rilevato.

Il raggio laser viene deflesso mediante un meccanismo di specchi rotanti ed oscillanti che, con il variare dell'angolo azimutale e zenitale, rileva l'oggetto mediante in punti contigui. Questo sistema opera misurando anche decine di migliaia di punti al secondo formando, così, delle "nuvole di punti". Per ogni misurazione il sistema fornisce il modello 3D della superficie oggetto di scansione.

La scansione con questo tipo di acquisizione ha interessato sia la parte dell'interno che l'esterno dell'edificio. La densità di scansione effettuata è stata non superiore a 5 mm.

In bibliografia esistono già delle scansioni Laser Scanner effettuate su Hagia Sophia (Hoffmann et al., 2016), che però sono frammentate oppure interessano solo una parte della struttura. Con la scansione realizzata nel periodo aprile 2013 – aprile 2014, sono state unite porzioni esterne ed interne delle nuvole di punti in un unico blocco, permettendo di determinare una serie di informazioni morfometriche di fondamentale importanza per la conoscenza dell'edificio, attività che è stata propedeutica ai fini della presente tesi.

Il prodotto derivante dalla scansione laser su Hagia Sophia è una nuvola di 165.955.894 punti, a ciascun dei quali sono associate le coordinate spaziali x, y e z relative alla stazione di acquisizione (Fig. 4.1).

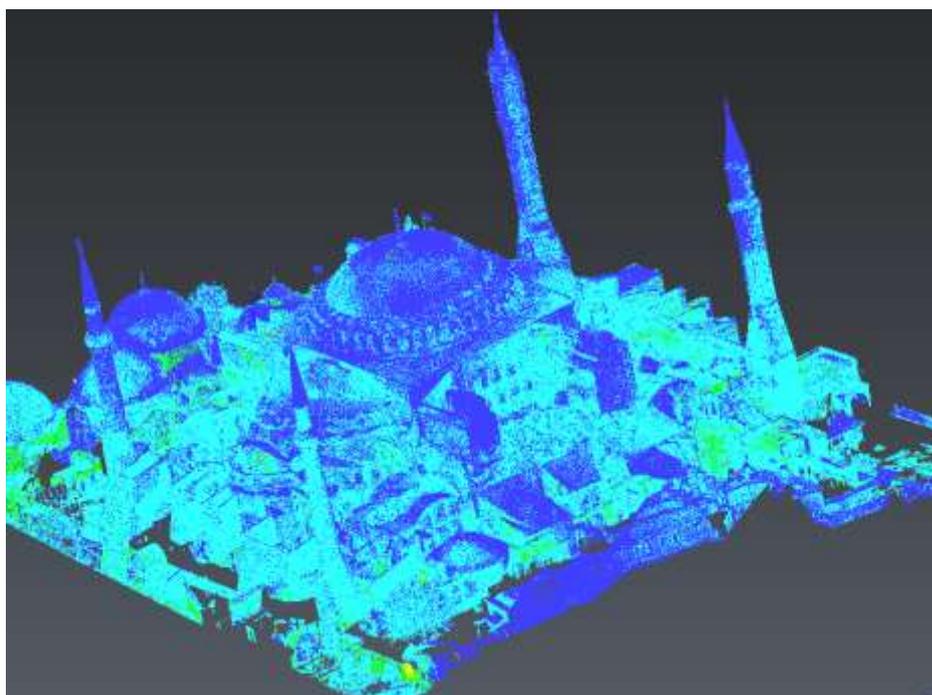


Fig. 4.1 Nuvola di punti campionata con laser scanner Leica HDS ScanStation 2.

Il file di output ha una estensione .IMP realizzato con software proprietari della Leica Geosystem. Lo stesso file è stato poi esportato, mediante il software Cyclone

della Leica Geosystem in formato .PTS, da quest'ultimo è stata poi effettuata una ulteriore conversione e compressione in formato .LAS. Quest'ultima, effettuata con un software opensource del Department of Computer Science della University of North Carolina at Chapel Hill denominato pointzip (Fig. 4.2), si è resa necessaria per poter importare lo stesso database nella piattaforma GIS utilizzata.

Il modello realizzato con questa tecnica di raccolta è estremamente dettagliato ma non ricopre il 100% dell'edificio; ciascuna scansione produce, infatti, una nuvola di punti che descrive solo parzialmente la zona inquadrata.

Tale limitazione deriva dalla difficoltà oggettiva di poter effettuare le acquisizioni in quote diverse rispetto a quelle effettuate. Difatti l'esterno è stato acquisito principalmente mediante scansioni dalla sommità dei quattro minareti. Per l'interno invece, pur effettuando numerosi punti di scansione non è stato possibile coprire l'intera basilica per la complessità planimetrica e la quantità degli ornamenti presenti.

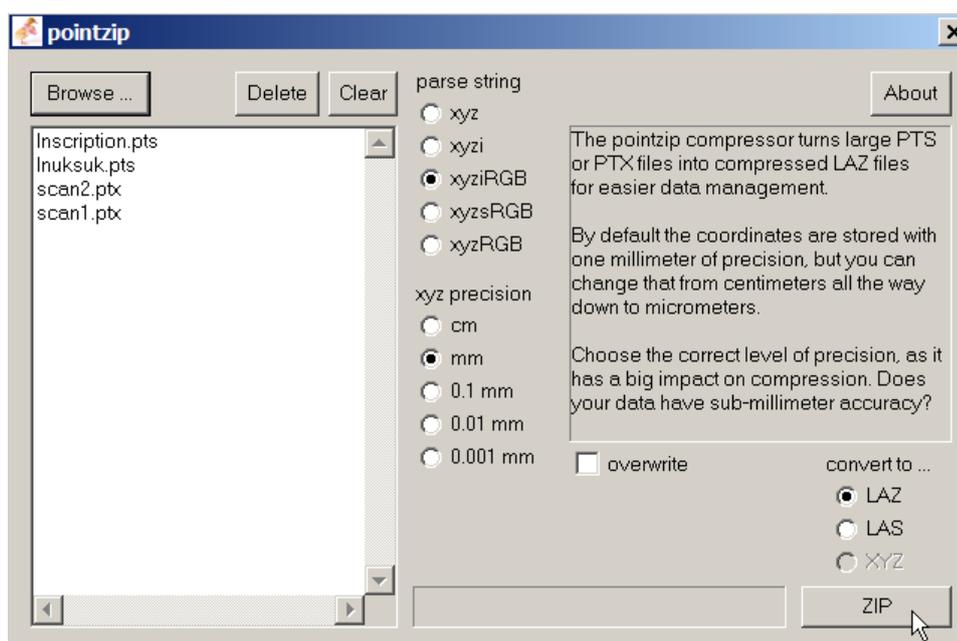


Fig. 4.2 Software pointzip utilizzato per la conversione da .pts a .las [da <https://cs.unc.edu/>].

4.1.2 Realizzazione di un modello 3D basato su prospetti storici

Durante il 1937, con lo scopo iniziale di intraprendere uno studio strutturale sulla cupola di Hagia Sophia, venne chiesta all'Architetto Robert Van Nice la realizzazione di apposite tavole. Lo studio si estese poi all'intero monumento grazie ai finanziamenti di William Emerson, preside di Architettura del Massachusetts Institute of Technology (MIT) e successivamente al centro di studi bizantini Dumbarton Oaks Research Library and Collection (Van Nice, 1965).

Tra il 1937 ed il 1985 il rilievo di Hagia Sophia, condotto da Van Nice, viene riconosciuto come un punto iniziale di riferimento per la conoscenza dell'edificio. Lo studio ha prodotto 46 tavole a scala differente ed a diverse angolazioni prospettiche dell'edificio di Hagia Sophia.

Sfruttando queste tavole ed i moderni software di restituzione 3D si è cercato di realizzare il primo modello tridimensionale della struttura di Hagia Sophia.

Lo studio è stato realizzato sfruttando le potenzialità delle NURB (Non-Uniform Rational B-Splines) (Altmann, 2002), rappresentazioni matematiche della geometria 3D che permettono di definire accuratamente qualsiasi forma geometrica nota (curve, archi, cerchi) e qualsiasi forma irregolare realizzata a mano libera.

Le potenzialità offerte dai software NURBS si adattano bene alla rappresentazione 3D delle tavole realizzate da Van Nice. Il software NURBS utilizzato per la ricostruzione è rappresentato dal software software Rhino3D della Robert Mcneel & Associates, scelto poiché in grado di creare, modificare, analizzare, curve, superfici, solidi, nuvole di punti e mesh poligonali NURBS.

La ricostruzione del modello 3D di Hagia Sophia basato sulle 46 tavole realizzate da Van Nice è stata articolata nelle seguenti fasi: reperimento materiale, posizionamento spaziale, digitalizzazione, unione.

Il materiale utilizzato è rappresentato dalla pubblicazione "Hagia Sophia: The construction of the second dome and its later repairs" (Van Nice, 1965) il file una volta normalizzato in formato immagine (per poter esser lavorato nel software) è stato importato nel software Rhino.

Dopo aver convertito in formato immagine .TIFF (formato accettato dal software) le tavole, si è provveduto a scalarle in modo da poterle sovrapporre con gli stessi riferimenti metrici(Fig. 4.3).

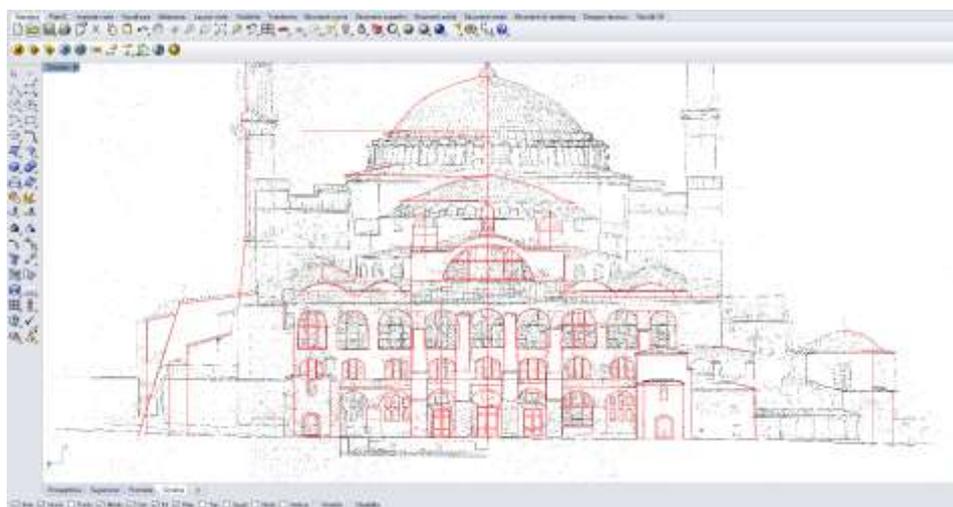


Fig. 4.3 Dettaglio del software Rhino, che mostra in rosso la parte in corso di digitalizzazione sull'immagine delle mappe di Van Nice.

Successivamente, le tavole sono state posizionate in uno spazio virtuale all'interno del software (Fig. 4.4), in base alle descrizioni riportate nelle tavole inerenti l'angolazione prospettica di realizzazione, il lato dell'edificio (Nord, Sud, Est, Ovest), il tipo di sezione (longitudinale o trasversale) ed il piano considerato.

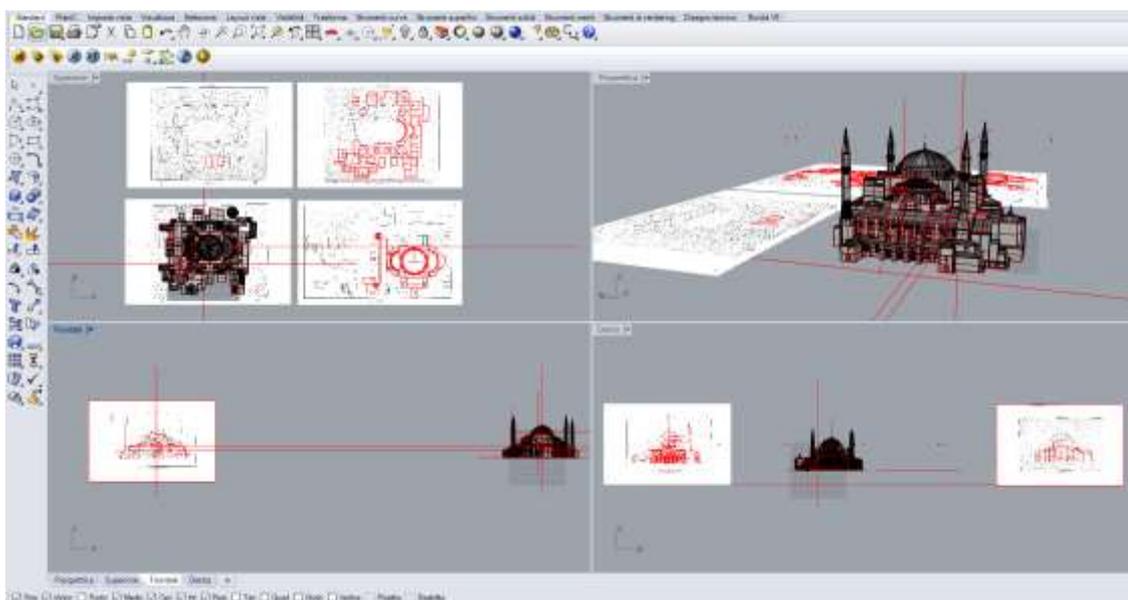


Fig. 4.4 Collocazione dei prospetti di Van Nice in funzione della loro collocazione geografica in ambiente Rhino.

Dopo aver digitalizzato le 46 “rappresentazioni grafiche dal vero” di Van Nice si è passati all’unione dei vari prospetti; quest’ultimo passaggio è stato particolarmente complicato a causa della mancanza dei necessari dettagli di collegamento tra i vari prospetti.

Dallo studio effettuato da Van Nice si evince, infatti, la mancanza del prospetto di una intera facciata (quella a Nord) oltre all’assenza, nei prospetti, di alcuni elementi architettonici di giunzione tra le varie facciate, rendendo quindi impossibile il collegamento tra alcuni prospetti e la conseguente operazione di “chiusura” del volume 3D. Utilizzando la nuvola di punti e le immagini da drone (Fig. 4.5) e da terra, realizzate nel 2014 in Turchia; è stato possibile unire i prospetti e realizzare il primo modello tridimensionale di Hagia Sophia, basato sulle tavole di Van Nice.



Fig. 4.5 Fotografia da drone che evidenzia punti di giunzione della struttura non presenti nelle tavole di Van Nice.

Le immagini da drone e da terra sono state utilizzate solo come documentazione sostitutiva delle non esaustive rappresentazioni grafiche di Van Nice.

Il modello 3D è stato realizzato prima unendo i vari prospetti digitalizzati e successivamente, si è provveduto a creare un modello solido.

La modalità a prospetti digitalizzati riporta solo le informazioni geometriche di superficie (i contorni) e viene definita “wireframe” (Inoue et al., 2003) (Fig. 4.6 a), mentre il modello solido riveste le superfici del wireframe con informazioni topologiche di vestizione (Fig. 4.6 b).

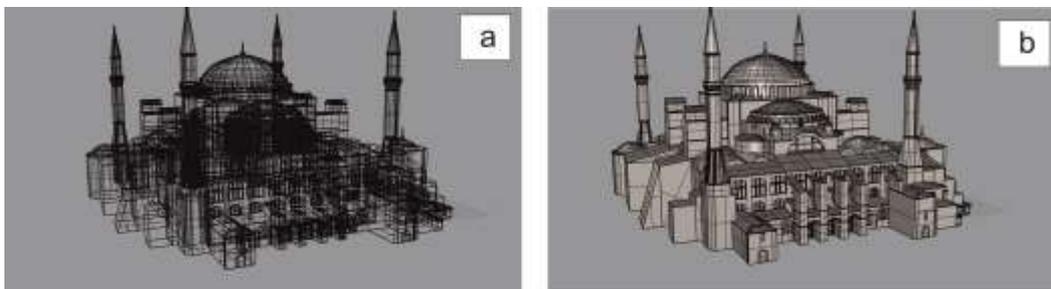


Fig. 4.6 Modello 3D realizzato in ambiente Rhino in modalità wireframe (a) ed in modalità modello solido (b).

Si è così ottenuto il primo modello solido 3D basato sulle 46 tavole realizzate da Emerson & Van Nice (Fig. 4.7), pubblicate nel 1951, con il titolo: “Hagia Sophia: The construction of the second dome and its later repairs”

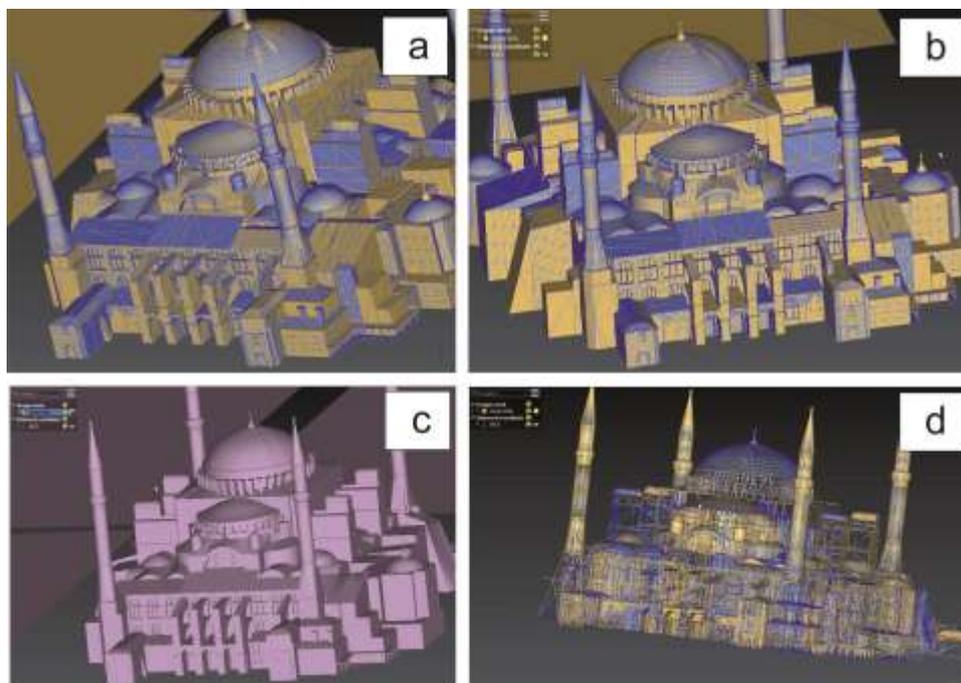


Fig. 4.7 Rappresentazione del modello 3D basato sulle tavole di Van Nice (Van Nice, 1965), vista texturizzata da SW (a), vista texturizzata da W (b), vista con mesh monocromatica da W (c), vista wireframe da SW (d).

4.1.3 Integrazioni fotografiche da terra e da drone nel sistema GIS

Realizzato il modello tridimensionale mediante il software Rhino, lo stesso è stato esportato in formato .3DS, ed in seguito si è effettuata la vestizione grafica tramite l'applicazione di una “texture”.

Le immagini catturate e processate tecnicamente in modo da poter essere posizionate sulla superficie poligonale, sono state sottoposte ad un processo di Polynomial Texture Mapping (conosciuto anche con il suo acronimo di PTM oppure come texture) (Earl et al., 2010). Tale processo è stato eseguito utilizzando la tecnica della registrazione per “punti di riferimento” o “control point” (Chen et

al., 1999) attraverso la quale è stato possibile “spalmare” l’immagine bidimensionale sul modello 3D. Utilizzando questa tecnica (Albouy et al., 2006), attraverso il software 3D Reshaper, e riutilizzando la planimetria di Van Nice del prospetto Ovest, si è provveduto ad identificare dei punti omologhi sul prospetto e sul modello solido e, attraverso dei semplici clic, sono stati associate alla planimetria le coordinate spaziali (x, y e z) del corrispondente modello 3D (Fig. 4.8).

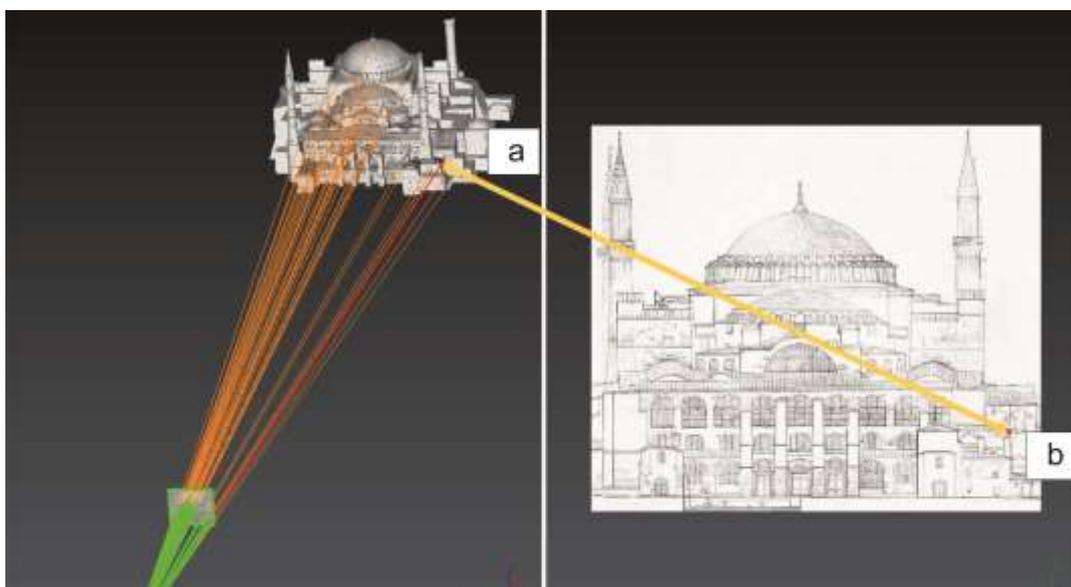


Fig. 4.8 Registrazione per punti di riferimento del prospetto Ovest realizzato da Van Nice (b), rispetto al modello 3D di Hagia Sophia (a).

Utilizzando 46 punti di controllo (Bastonero et al., 2014) è stato possibile ricostruire l’angolazione del prospetto rispetto al modello 3D e l’angolo dei punti di controllo rispetto alla terna cartesiana del modello solido; il risultato (Fig. 4.9) è rappresentato dalla visione tridimensionale delle planimetrie realizzate da Van Nice nel secolo scorso.

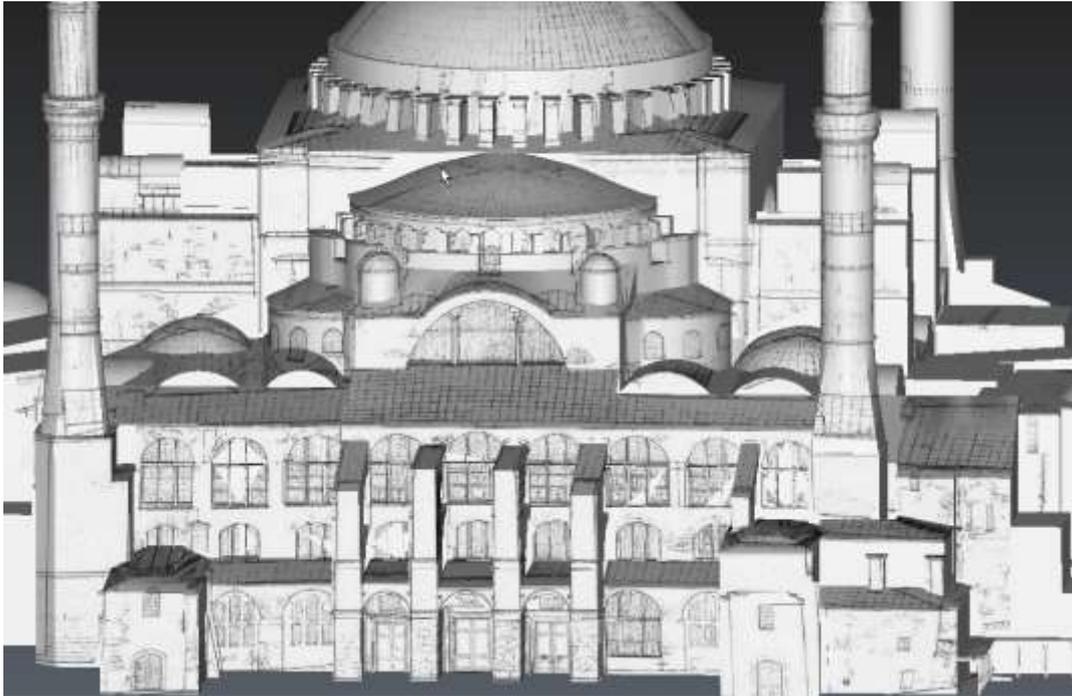


Fig. 4.9 Visione tridimensionale della planimetria di Van Nice lato Ovest, sul modello solido di Hagia Sophia.

L'operazione di registrazione per "punti di riferimento" può essere applicata a qualsiasi immagine raster disponibile sull'edificio; eventuali immagini fotografiche possono essere usate per creare una texture di rivestimento ad Hagia Sophia (Fig. 4.10).

Completata la creazione del modello 3D texturizzato (Johnson & Kang, 1999), si è passati all'importazione dei dati all'interno del software GIS "Terraexplorer Pro". Il software è distribuito dalla SkylineGlobe, azienda con sede ad Herndon (USA). Tale software è stato scelto per le sue peculiari caratteristiche nel gestire, in modo snello, grandi quantità di dati, con differenti formati. L'operazione preliminare all'integrazione del modello tridimensionale creato nel sistema GIS, consiste nel rappresentare questo modello sulla superficie della terra attraverso l'associazione di coordinate geografiche definite: latitudine, longitudine ed altitudine; il processo è noto anche come georeferenziazione o geolocalizzazione.



Fig. 4.10 Registrazione per punti di riferimento di un fotogramma del prospetto W sul modello 3D di Hagia Sophia (a), utilizzando un fotogramma da terra (b).

Esistono due procedure per geo referenziare un oggetto all'interno di un GIS:

1. **Conoscendo le reali coordinate geografiche dell'oggetto:** usando apposite strumentazioni di misura topografiche (stazioni totali o gps topografici) è possibile determinare l'esatta collocazione spaziale di punti di un oggetto (spigoli, bordi, elementi strutturali) rispetto ad un sistema di coordinate predefinito (datum).
2. **Usando dei punti di riferimento:** con questa procedura vengono identificati dei punti omologhi su un volume o una superficie, di cui già si conoscono i riferimenti spaziali. La terna di coordinate geografiche spaziali (x, y, z) del corrispondente volume o superficie, è attribuita attraverso dei semplici click del mouse. L'operazione di riproiezione dell'oggetto è possibile solo dopo che un numero sufficiente di punti vengono selezionati sulle due superfici (normalmente da 3 a 5 punti).

Per la georeferenziazione del modello è stato utilizzato il secondo metodo (usando i punti di riferimento). La superficie di cui già si conoscevano i riferimenti spaziali è rappresentata da una ortofoto satellitare ad alta risoluzione di 247 Mb, con un ricoprimento di 3.140 x 2.500 metri (Fig. 4.11).



Fig. 4.11 Modello 3D Hagia Sophia georeferenziato su ortofoto satellitare nel software Terraexplorer Pro.

Sfruttando il database disponibile in Cura (2016), si è provveduto a caricare i dati di raccolta dei 29 laterizi di Hagia Sophia. Per ogni campione è stata inoltre inserita la foto del campionamento e le relative immagini della sezione sottile realizzata sia a nicoli paralleli che incrociati (Fig. 4.12).

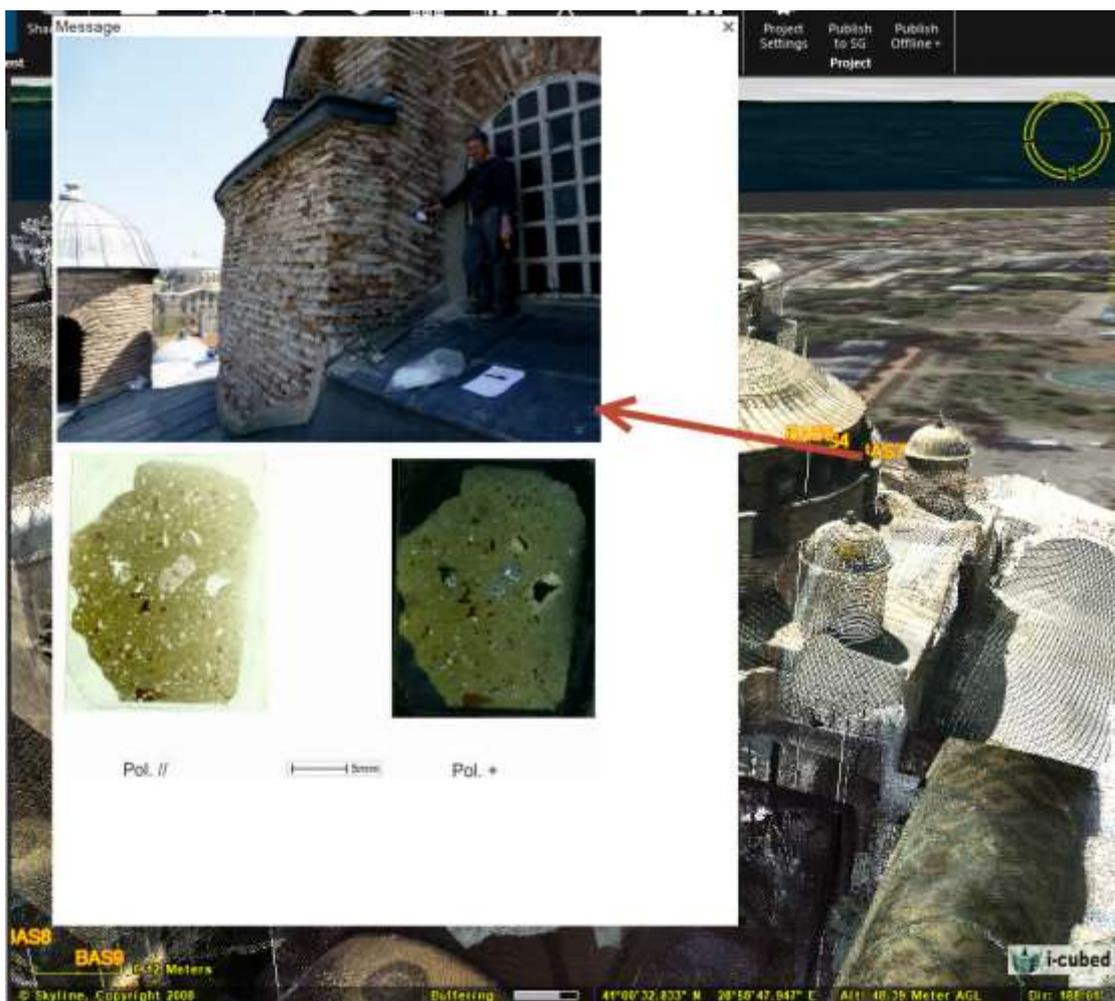


Fig. 4.12 Esempio di posizionamento dei punti di campionamento dei laterizi sulla struttura GIS3D.

4.2 Interpolazione tridimensionale di dati numerici - l'esempio della temperatura

Uno degli obiettivi del presente lavoro di tesi è costituito dalla realizzazione di un sistema GIS3D che consenta di implementare, in un geodatabase, dati numerici di ogni tipo che, per esempio, potrebbero derivare anche da misure di tipo fisico o dalle caratterizzazioni composizionali dei materiali di cui Hagia Sophia è costituita.

Per testare tale possibilità, senza procedere a campionamenti mirati e ad analisi di tipo distruttivo, si è deciso di lavorare su simulazioni di variabili fisiche numeriche. Una delle variabili che più si presta a tale scopo, per il suo evidente

carattere di tridimensionalità, è la distribuzione volumetrica della temperatura all'interno della struttura architettonica.

L'attuale museo di Hagia Sophia è, infatti, oggetto di forti escursioni termiche nei vari periodi dell'anno ed in alcuni particolari orari del giorno e della notte, a causa della notevole inerzia termica delle murature e del rivestimento in piombo della cupola. Il piombo ha infatti un alto coefficiente di dilatazione termica, pari a 29×10^{-6} e, a causa degli sbalzi, la cupola, e di conseguenza l'intera struttura, risentono di questi processi di dilatazione.

Per riprodurre le operazioni di interpolazione tridimensionale fissate come obiettivo del presente lavoro è stata simulata una distribuzione di temperatura misurata all'interno di un parallelepipedo, su un sufficiente numero di dati numerici.

Per valutare la realizzabilità di una ricostruzione matematica del campo spaziale di temperatura tramite interpolazione di valori misurati, è stato considerato il volume V di $60 \times 30 \times 30$ metri al quale è stata assegnata, con una risoluzione di 1 metro, una distribuzione sintetica di temperatura $T_s(x,y,z)$ che simula la temperatura "vera" presente.

Per rendere plausibili i valori di T_s , si è ipotizzata la presenza di un gradiente con uno spigolo in alto più caldo a T_{max} , ed uno più freddo in basso a T_{min} . Tale distribuzione potrebbe corrispondere sia ad un diverso irraggiamento delle varie parti della struttura, sia ad una diversa risposta dei materiali all'irraggiamento solare.

La struttura spaziale della temperatura è stata definita tramite la seguente espressione:

$$S(x, y, z) = -e^{\left(\frac{x-x_0}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{\sigma_y}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{\sigma_z}\right)^2}$$

dove:

$$x_0(z) = \frac{1}{12}(z - 1) - 5$$

$$y_0(z) = \frac{1}{20}(z - 1) + 3$$

$$z_0(z) = z$$

$$\sigma_x(z) = 10 (z - 1) + 200$$

$$\sigma_y(z) = \frac{10}{3} (z - 1) + 400$$

$$\sigma_x(z) = 5 (z - 1) + 300$$

Una volta calcolata S sui punti del volume V, per avere un range di variazione che possa essere tipico di una distribuzione di temperatura i valori ottenuti sono stati riscaldati linearmente tra $T_{min}=24^{\circ}\text{C}$ e $T_{max}=30^{\circ}\text{C}$, secondo la seguente espressione:

$$T_s(x, y, z) = \frac{T_{max} - T_{min}}{\max(S(x, y, z) - \min(S(x, y, z)))} (S(x, y, z) - \min(S(x, y, z))) + T_{min}$$

Per simulare il processo di misura della temperatura, si è simulato il campionamento del campo T_s ogni 10 metri e sono stati ottenuti dei “valori misurati” T_m (Fig. 4.13):

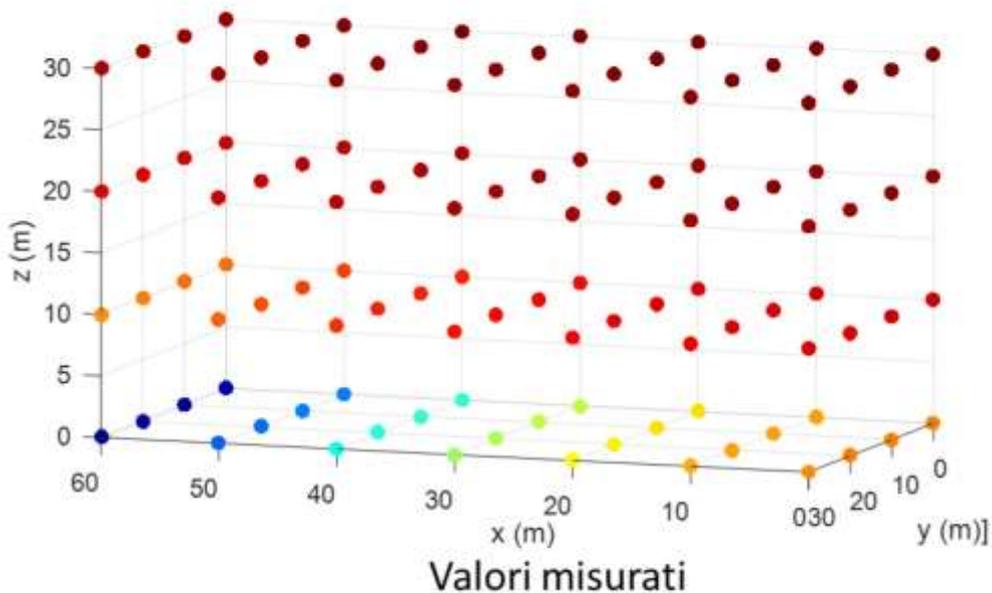


Fig. 4.13 Simulazione in Matlab, del processo di misura della temperatura ogni 10 metri.

I 112 “valori misurati” così ottenuti sono stati interpolati tramite la funzione “griddata” di MATLAB, e il campo di temperatura è stato ricostruito alla risoluzione di 1 metro (Fig. 4.14).

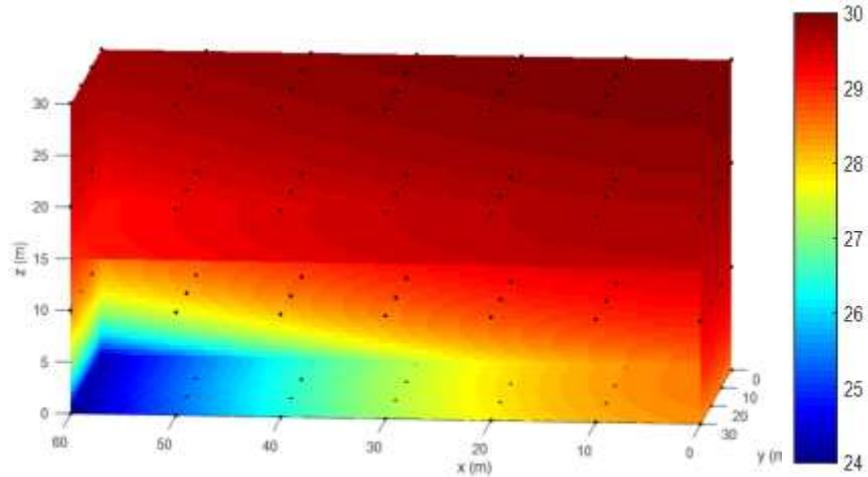


Fig. 4.14 Simulazione in Matlab, del processo di misura della temperatura interpolato tramite funzione griddata ad 1 metro.

Il volume così realizzato della figura 4.10 è stato creato utilizzando le misure 60x30x30 metri che corrispondono all'incirca alle misure della navata centrale di Hagia Sophia (Fig. 4.15).

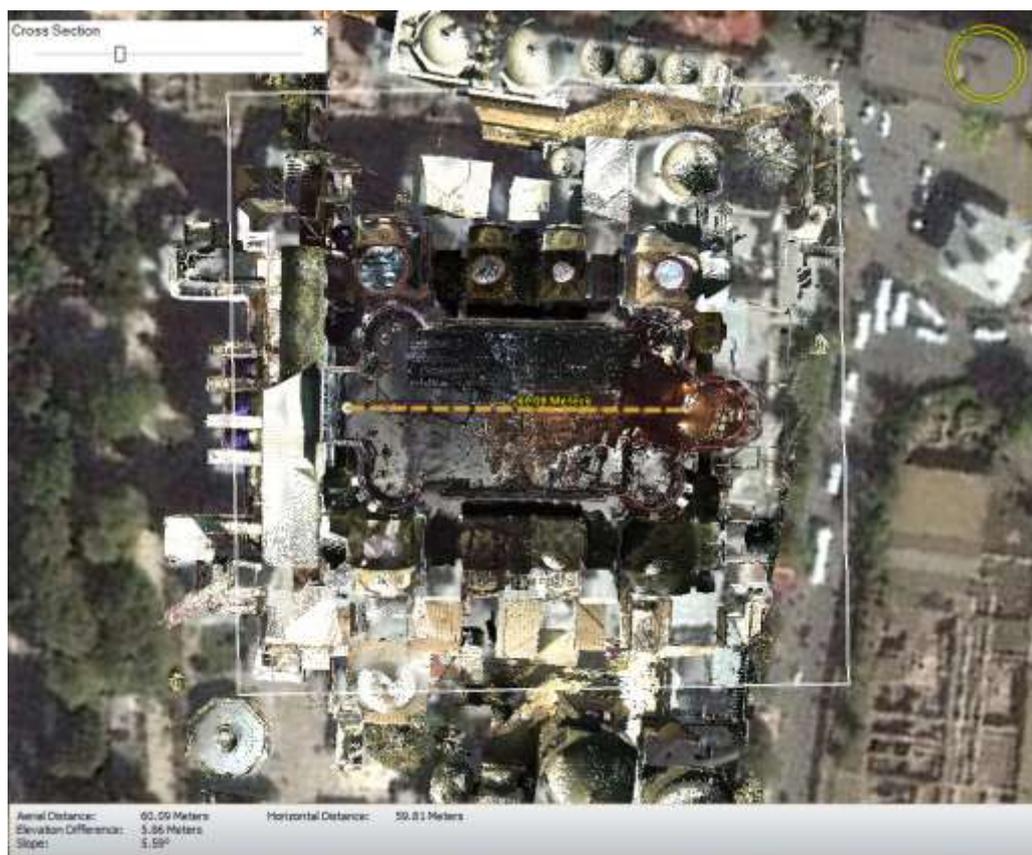


Fig. 4.15 Lunghezza della navata centrale di Hagia Sophia, ottenuta tramite misurazione nell'ambiente GIS3D realizzato, segmentando la nuvola di punti con un piano parallelo al suolo ad una altezza di circa 5 metri dal pavimento.

Utilizzando la procedura di georeferenziazione “per punti di riferimento” sono stati identificati i punti omologhi del parallelepipedo con la distribuzione della temperatura e quelli dell'interno della navata di Hagia Sophia (Fig. 4.16_I-II-III-IV).

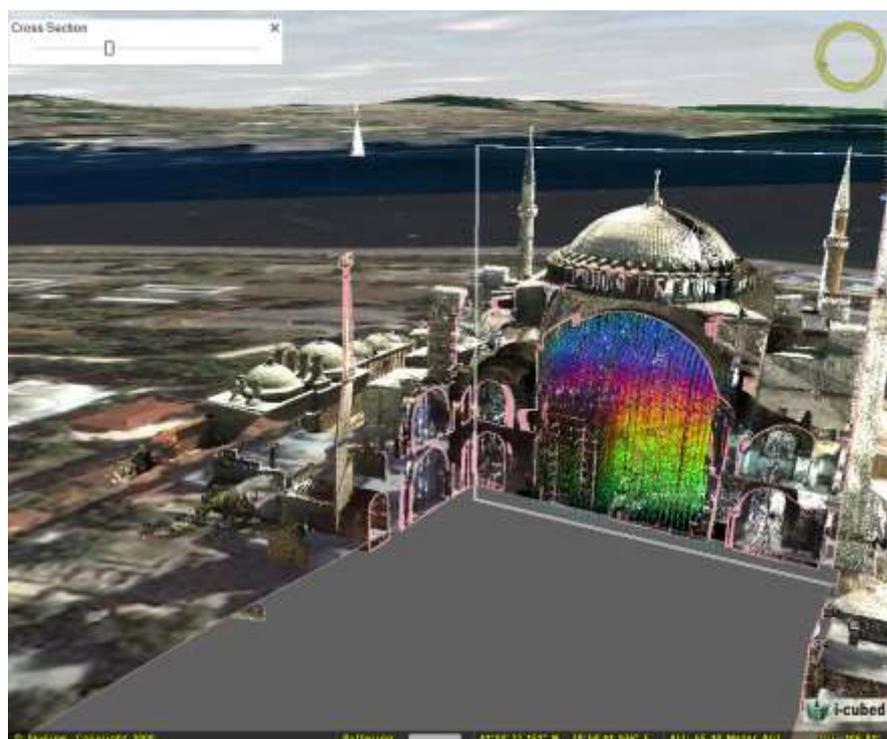


Fig. 4.16_I. Visione della distribuzione di temperatura all'interno di Hagia Sophia, ottenuta segmentando la struttura per un piano ortogonale al pavimento.

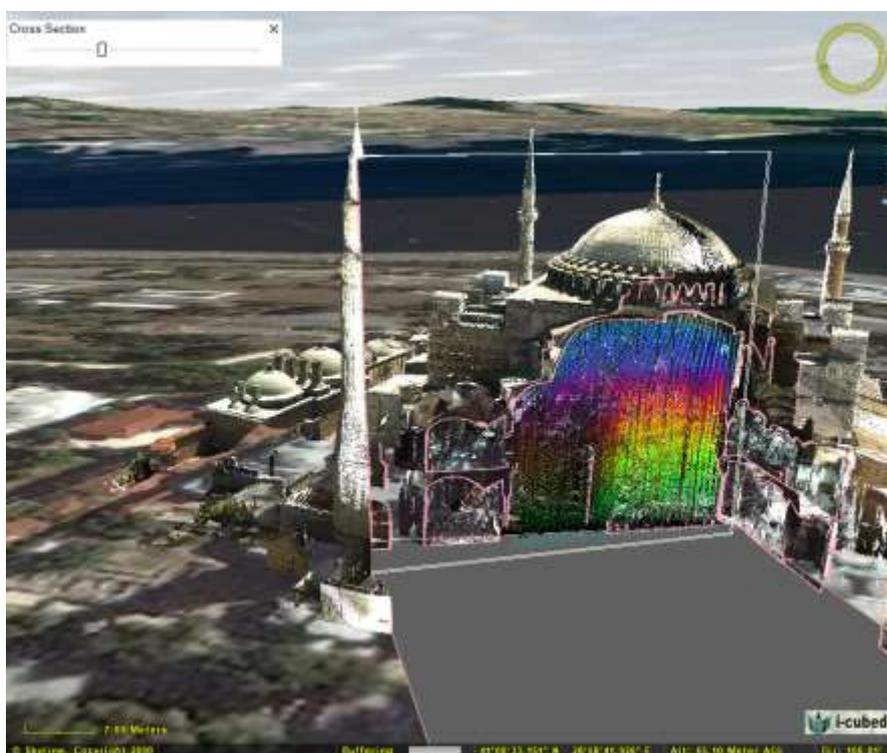


Fig. 4.16_II. Visione con diversa angolazione della distribuzione di temperatura all'interno di Hagia Sophia, ottenuta segmentando la struttura per un piano ortogonale al pavimento.

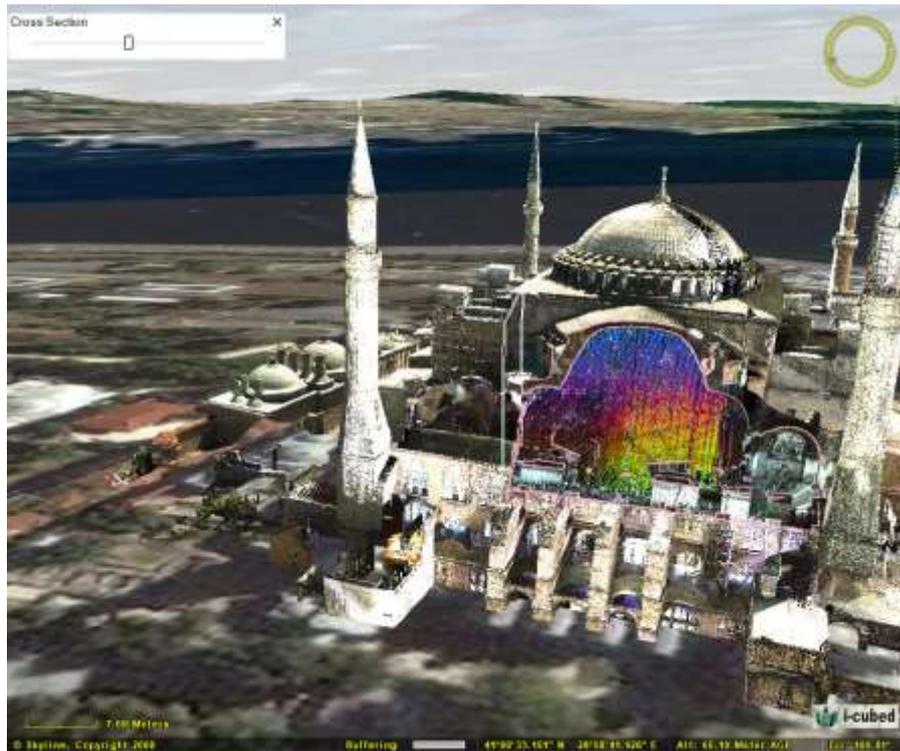


Fig. 4.16_III. Visione con diversa angolazione della distribuzione di temperatura all'interno di Hagia Sophia, ottenuta segmentando la struttura per un piano ortogonale al pavimento.

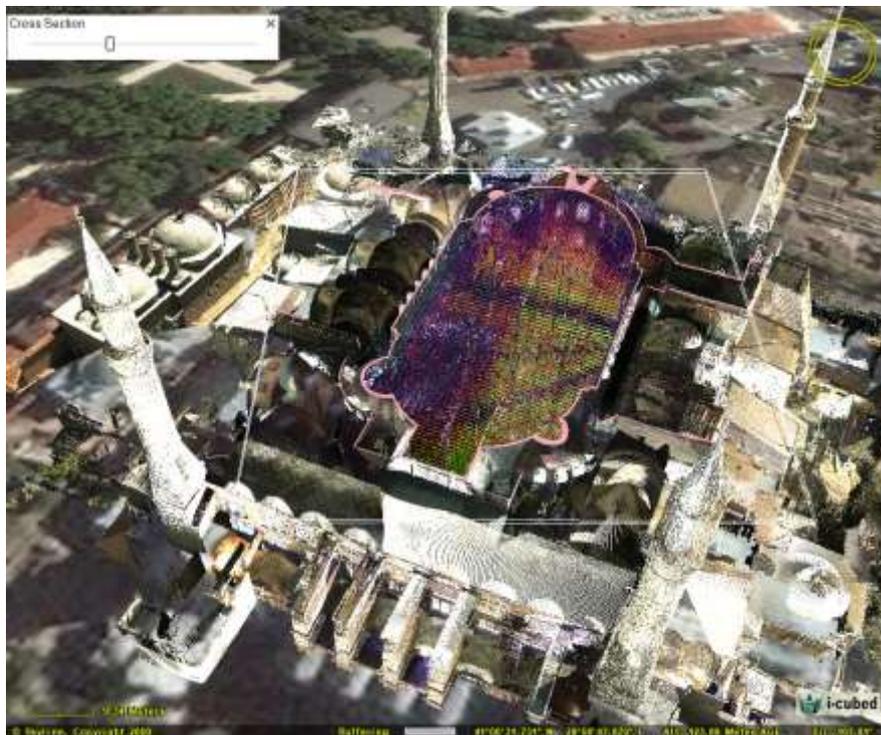


Fig. 4.16_IV. Visione della distribuzione di temperatura all'interno di Hagia Sophia, ottenuta segmentando la struttura per un piano parallelo al pavimento.

4.3 I laterizi di Hagia Sophia

4.3.1 Caratteristiche macroscopiche

Come ampiamente riportato nella bibliografia storico-architettonica (Emerson et al., 1950; Fossati, 1890; Hoffmann, 1999; Kinross, 1974; Mainstone, 1999, 2009; Mango, 1978; Van Nice, 1965), l'edificio di Hagia Sophia è fortemente caratterizzato dall'uso massiccio di laterizi.

L'aspetto macroscopico delle murature esterne appare, in prima analisi, estremamente omogeneo. Tale omogeneità diventa via via meno evidente, man mano che l'osservatore si avvicina alle murature; ecco allora che l'apparente "omogeneità cromatica", tende a scomparire.

Dal punto di vista macroscopico i 29 campioni mostrano significative differenze cromatiche (Fig. 4.17): si passa da colorazioni che vanno dal rossiccio acceso del campione BAS3, al giallino terroso del campione BAS7, passando per il rosa tenue del campione BAS28.



Fig. 4.17. Alcune tra le maggiori differenze cromatiche nei campioni di laterizio di Hagia Sophia, nei campioni BAS3 (a), BAS7 (b) e BAS28(c).

In prima analisi, utilizzando le tavole Munsell è stato possibile attribuire a ciascun campione i rispettivi codici Munsell (Tabella 4.1).

Tuttavia l'attribuzione del codice Munsell dipende molto da chi compie l'osservazione; per limitare i problemi di soggettività e comparare il colore dei vari campioni in modo semi-quantitativo e a basso costo, sono state determinate le

coordinate colorimetriche nello spazio RGB (Tabella 4.2), lavorando sulle immagini acquisite allo scanner in condizioni standard.

	Colore Munsell
BAS1	2.5YR6/8
BAS2	2.5YR5/6
BAS3	10R4/8
BAS4	2.5YR5/8
BAS5	10YR6/4
BAS6	10YR5/6
BAS7	10YR7/6
BAS8	2.5YR6/8
BAS9	5YR6/6
BAS10	2.5YR6/6
BAS11	10R5/8
BAS12	2.5YR5/6
BAS13	2.5YR6/6
BAS14	5YR6/6
BAS15	2.5YR5/6
BAS16	10R4/6
BAS17	10R5/8
BAS18	2.5YR5/8
BAS19	10R5/8
BAS20	2.5YR3/6
BAS21	2.5YR4/8
BAS22	10R5/10
BAS23	2.5YR6/6
BAS24	10R7/6
BAS25	2.5YR5/6
BAS26	2.5YR5/6
BAS27	5YR7/6
BAS28	2.5YR7/4
BAS29	2.5YR6/6

Tabella 4.1 Tabella con i codici Munsell relativi ai campioni di laterizio di Hagia Sophia.

	R	G	B
BAS1	182	125	90
BAS2	162	114	87
BAS3	129	72	54
BAS4	161	100	70
BAS5	169	148	111
BAS6	165	112	91
BAS7	193	168	115
BAS8	183	123	86
BAS9	171	121	86
BAS10	167	123	99
BAS11	158	97	73
BAS12	150	98	71
BAS13	167	119	92
BAS14	181	131	96
BAS15	154	105	82
BAS16	127	83	68
BAS17	158	98	73
BAS18	171	108	72
BAS19	152	87	61
BAS20	114	64	46
BAS21	141	91	59
BAS22	172	98	60
BAS23	169	127	98
BAS24	188	148	124
BAS25	159	118	94
BAS26	157	115	90
BAS27	190	152	118
BAS28	186	151	133
BAS29	184	130	102

Tabella 4.2 Dati colorimetrici RGB semiquantitativi relativi ai laterizi.

La variabilità cromatica percepita ad occhio nudo è spiegata, effettivamente, dalla corrispondente variabilità dei parametri RGB di ciascun campione (Fig. 4.18).

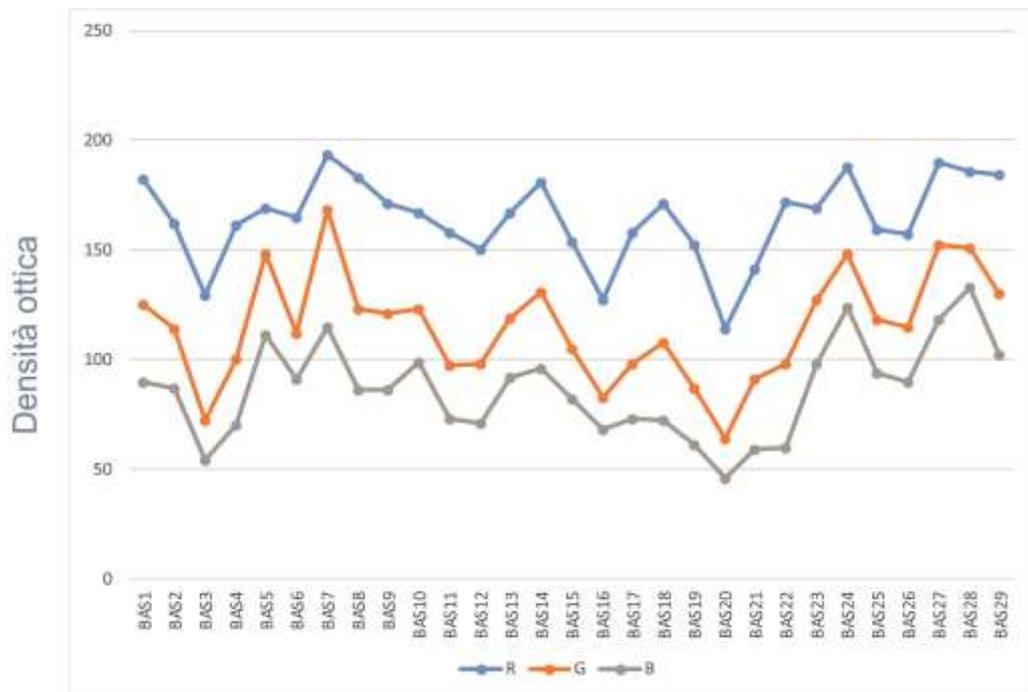


Fig. 4.18 Andamento dei parametri RGB nei laterizi studiati.

Plottando le variabili RGB nello spazio tridimensionale (Fig. 4.19) è possibile apprezzare ancor di più le analogie e le differenze cromatiche tra i vari campioni, che appaiono tanto più vicini, quanto più risultano macroscopicamente simili.

Da queste prime osservazioni e misure semi-quantitative di cromaticità, non è possibile estrapolare informazioni significative sulle eventuali analogie composizionali dei campioni poiché, dalla stessa fornata di campioni composizionalmente omogenei, si possono ottenere anche laterizi cromaticamente molto dissimili tra loro (Miriello, 2005; Miriello et al., 2007), semplicemente per il fatto che nei forni antichi la temperatura e la presenza di ossigeno all'interno degli stessi risultava difformemente distribuita. Tuttavia la colorazione dei campioni tendente al rossiccio, consente di stabilire che l'ambiente di cottura in cui sono stati prodotti i laterizi di Hagia Sophia è di tipo ossidante.

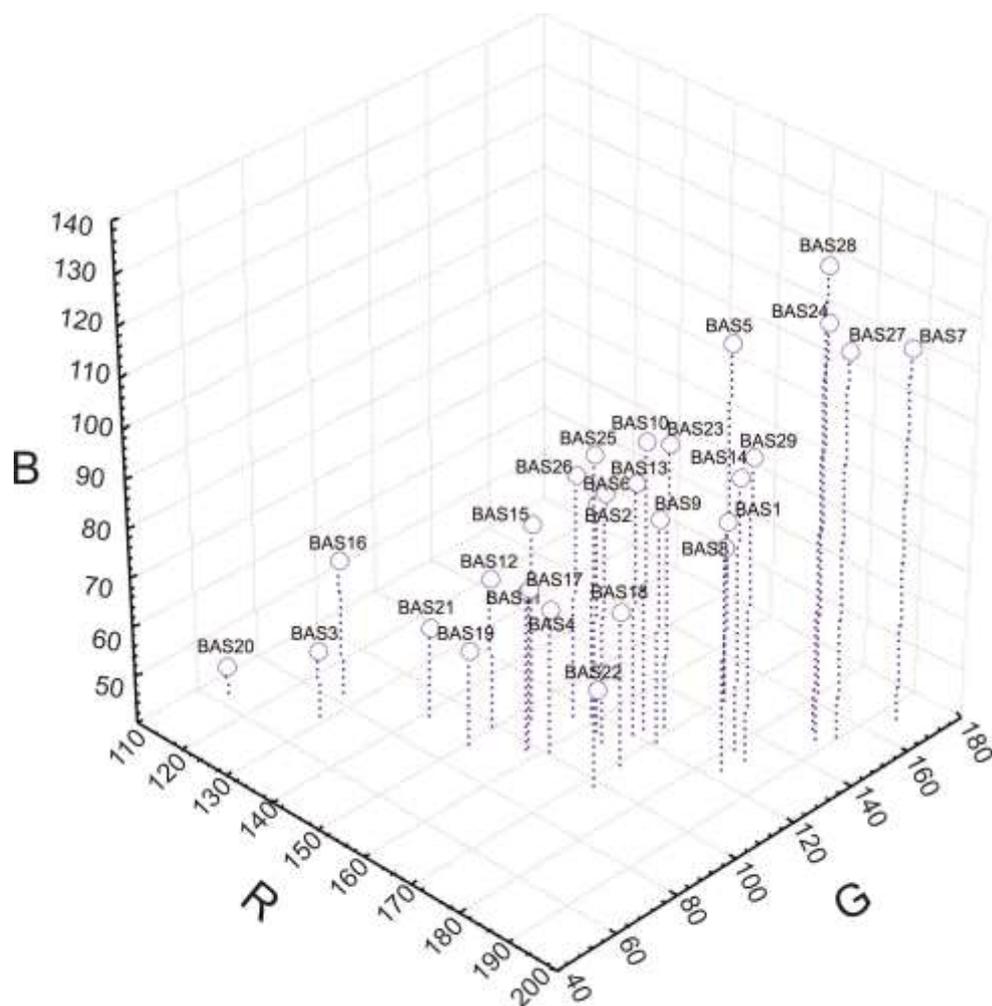


Fig. 4.19 3D plot dei dati colorimetrici RGB semiquantitativi relativi ai laterizi.

Un'altra osservazione di carattere metodologico, che è possibile compiere, riguarda il fatto che campioni a cui è stato attribuito lo stesso codice Munsell (es: BAS2, BAS12, BAS15, BAS25 e BAS26) dall'operatore, risultano significativamente diversi dal punto di vista colorimetrico.

Ciò suggerisce che l'utilizzo dei codici Munsell risulta ormai obsoleto, alla luce delle tecniche di Imaging a basso costo che ormai consentono di effettuare comparazioni cromatiche quantitative utilizzando software dedicati.

In prima analisi le osservazioni ad occhio nudo consentono di evidenziare in tutti i campioni la presenza di vacuoli, mediamente di dimensioni millimetriche; inoltre in tutti i campioni è possibile percepire la presenza di clasti appartenenti allo scheletro, di dimensioni superiori ai 3 mm.

4.3.2 Caratteristiche geochemiche

Dall'osservazione della tabella riassuntiva delle variabili chimiche descrittive relative agli elementi maggiori (Tabella 3.5), emerge che la variabilità massima degli elementi chimici si ha per quelle variabili la cui concentrazione risulta maggiore: SiO₂, CaO e Al₂O₃.

La silice varia da valori minimi del 38.9% nel campione BAS16 a valori massimi del 64.2% nel campione BAS3. L'Al₂O₃ varia da un minimo dell'11.7% nel campione BAS16 ad un massimo del 19.9% nel campione BAS17, mentre i valori di CaO vanno da un minimo dell'1.4% nel campione BAS3 ad un massimo del 19.2% nel campione BAS16.

Per quanto riguarda gli elementi in tracce (Tabella 3.6) la variabilità chimica maggiore si registra, in ordine decrescente, per il cromo (Cr), il nichel (Ni), lo stronzio (Sr), il bario (Ba), lo zirconio (Zr) e il vanadio (V). Tuttavia variabilità così elevate per gli elementi in tracce non devono assolutamente farci giungere a conclusioni affrettate per quel che riguarda l'effettiva disomogeneità dei campioni. Infatti, in due laterizi teoricamente preparati con le stesse materie prime e con gli stessi degrassanti, miscelati con le medesime proporzioni, leggere differenze di granulometria nel degrassante possono comportare significative variabilità chimiche negli elementi in tracce dei due campioni. Ciò non significa, dal punto di vista archeometrico, che i laterizi siano effettivamente prodotti da *fabric* diverse. Per questo, prima di formulare ipotesi su eventuali analogie o differenze tra i vari campioni è fondamentale compiere una approfondita caratterizzazione mineralogica e petrografica attraverso la microscopia ottica luce polarizzata trasmessa coadiuvata dalla diffrattometria a raggi X.

4.3.3 Caratteristiche minero-petrografiche

L'osservazione petrografica in sezione sottile ha messo in evidenza la presenza di una mineralogia abbastanza omogenea per tutti i campioni. Combinando i dati microscopici con i dati XRPD appare chiara la presenza predominante di quarzo

praticamente in tutti i campioni, e successivamente, in ordine di abbondanza decrescente, di plagioclasio, ortoclasio, miche (muscovite e biotite) e minerali opachi (Tabella 3.2).

In Fig. 4.20 sono riportate alcune microfotografie che evidenziano i minerali predominanti riscontrati attraverso l'osservazione petrografica.

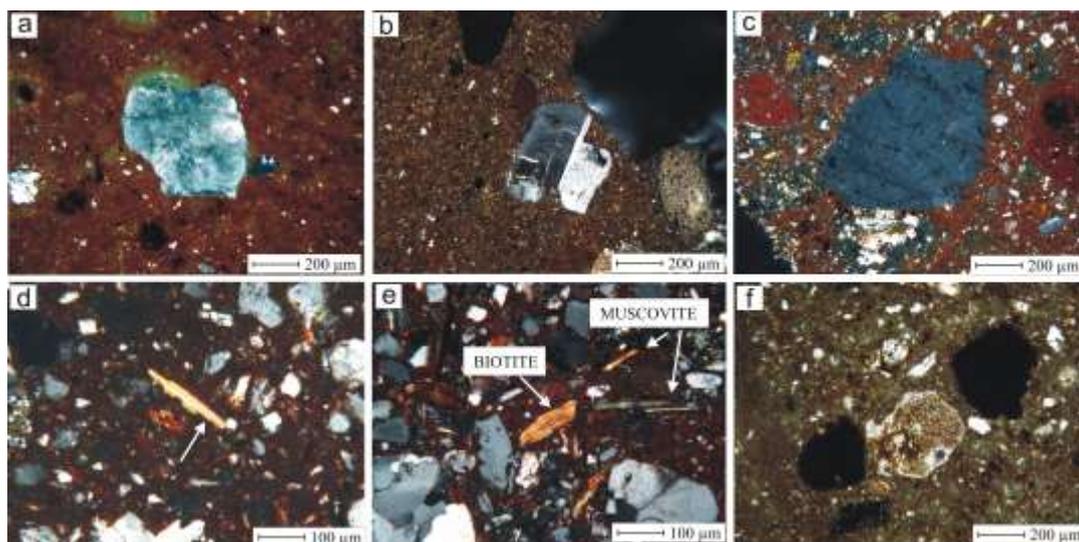


Figura 4.20 Micro foto eseguite al microscopio ottico polarizzatore a nicol incrociati, ad eccezione di (f) a nicol paralleli. a) quarzo nel campione BAS2. b) plagioclasio nel campione BAS14. c) ortoclasio nel campione BAS9. d) muscovite nel campione BAS19. e) biotite e muscovite nel campione BAS19. f) minerali opachi nel campione BAS27.

In tutti i campioni è stata rilevata la presenza di calcite secondaria ricristallizzata nei vacuoli (Fig. 4.21). La presenza di calcite secondaria nei lapidei di Hagia Sophia, siano essi naturali o artificiali, è stata rilevata anche in lavori precedenti (Miriello et al, 2017; Moropoulou, 2002, 2002b, 2003, 2013); infatti, da questi lavori è emerso che le murature della struttura architettonica sono state permeate negli anni da acque percolanti, provenienti, dalle piogge e da fenomeni di risalita capillare (nelle parti prossime al suolo). Quindi la calcite presente nei vari campioni è dovuta essenzialmente a fenomeni di cristallizzazione secondaria. Soltanto nel campione BAS12 è stata rilevata la presenza di rari bioclasti (Fig. 4.22).

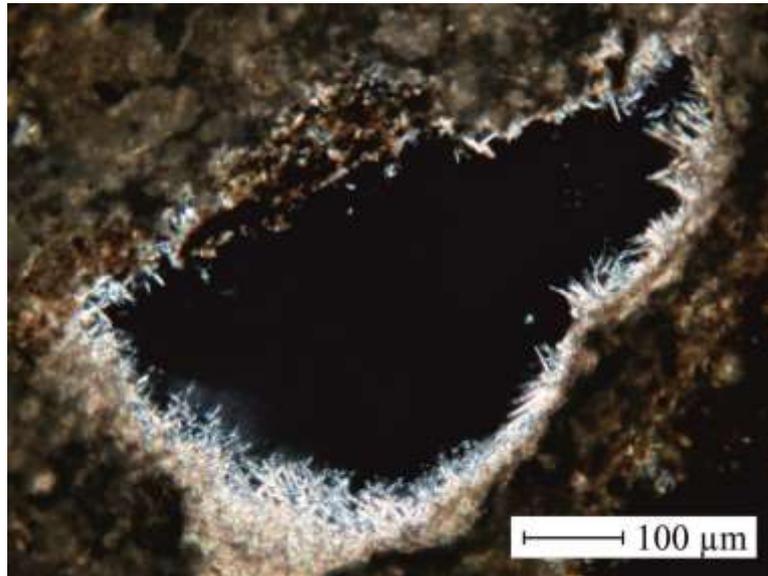


Figura 4.21 Micro-foto eseguita al microscopio ottico polarizzatore a nicol incrociati con particolare di calcite cristallizzata all'interno di un poro nel campione BAS12.

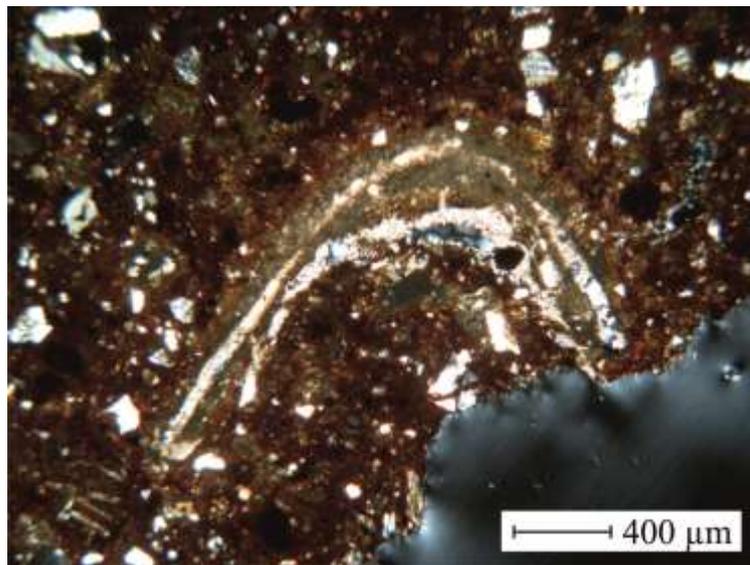


Figura 4.22 Micro-foto eseguita al microscopio ottico polarizzatore a nicol incrociati di un bioclasto presente all'interno del campione BAS12.

Grazie all'analisi modale è stato possibile stimare nel dettaglio la presenza di calcite secondaria nei pori, che varia da un minimo dello 0.9% del campione BAS20 ad un massimo del 10.2% del campione BAS12 (Tabella 3.3).

Le analisi mineralogiche (Tabella 3.4) eseguite mediante diffrattometria a raggi X (XRPD) hanno consentito di rilevare la presenza di ematite nella maggior parte dei campioni, che dimostra la cottura dei laterizi in condizioni ossidanti, come già rilevato dalle osservazioni macroscopiche.

È da notare come la microscopia ottica a luce polarizzata trasmessa non abbia evidenziato la presenza di pirosseni primari, mentre la diffrattometria a raggi X (XRPD) ha permesso di rilevare la presenza di diopside nella maggior parte dei campioni che non è stata invece osservata con la microscopia ottica in luce polarizzata. Ciò significa che i pirosseni presenti nei campioni di Hagia Sophia si ritrovano sotto forma di cristalli micrometrici (Miriello et al., 2015) formati secondariamente in seguito al raggiungimento di temperature superiori a 900 °C durante la fase di cottura.

La tipologia di rocce che prevale in tutti i campioni è quella delle metamorfite; in particolare quarziti (Fig. 4.23), seguita da rocce granitoidi (Fig. 4.24).

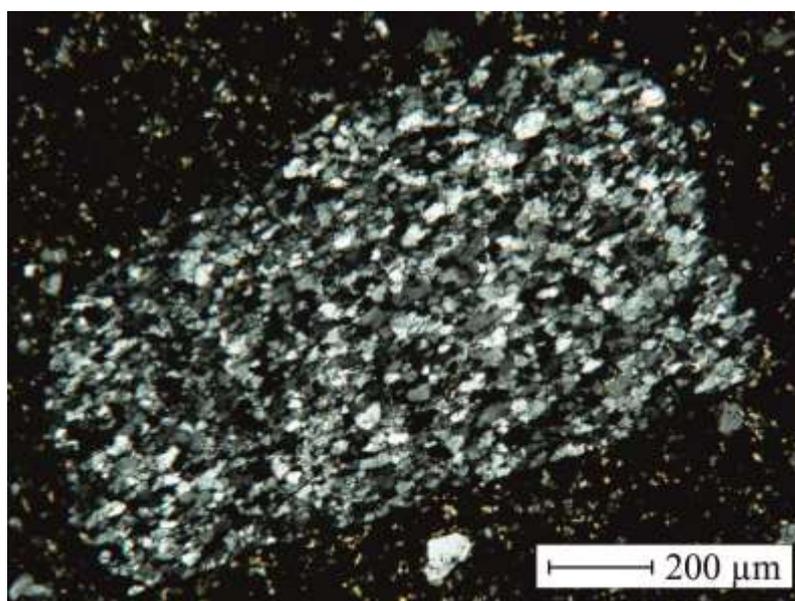


Fig. 4.23 Micro-foto eseguita al microscopio ottico polarizzatore a nicol incrociati di un frammento di quarzite presente nel campione BAS12.

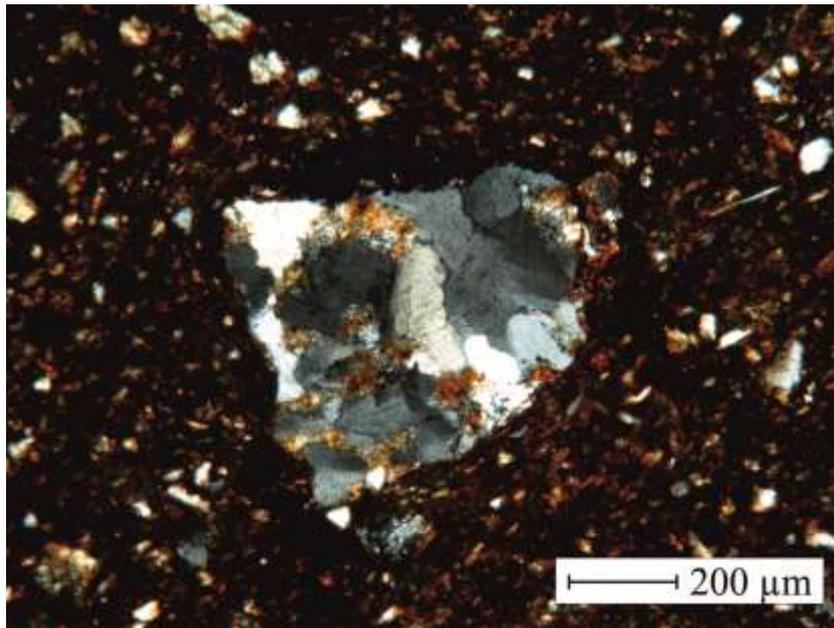


Figura 4.24 Micro-foto eseguita al microscopio ottico polarizzatore a nicol incrociati di frammento di roccia granitoide presente nel campione BAS 4.

Le vulcaniti non sembrano caratterizzare i campioni poiché sono state riscontrate sempre in tracce. La composizione delle vulcaniti, lì dove rilevate, varia da trachi-basalti a rioliti (Fig. 4.25). Il dettaglio della loro composizione chimica è riportato nel diagramma TAS (vedi paragrafo 3.6) e nella tabella delle analisi microchimiche EDS (Tabella 3.8)

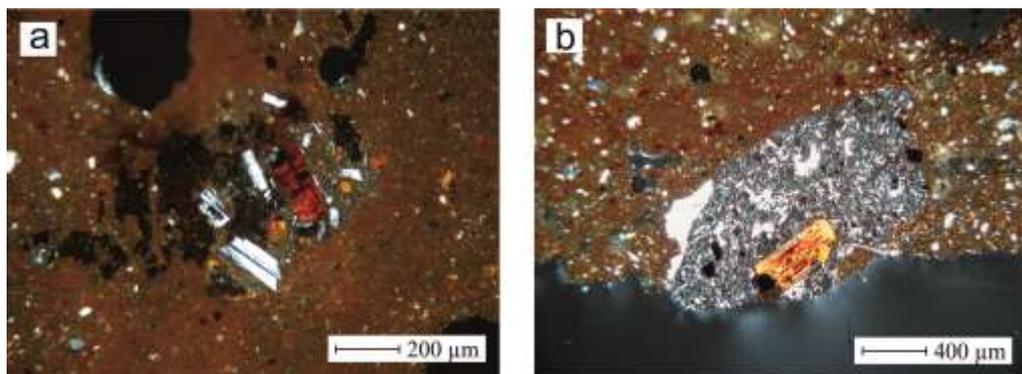


Figura 4.25 Micro-foto eseguite al microscopio ottico polarizzatore a nicol incrociati. a) frammento di roccia trachi-basaltica presente nel campione BAS22. b) frammento di roccia riolitica presente nel campione BAS10.

Nella maggior parte dei campioni è stata rilevata la presenza di *chamotte* (Fig. 4.26), quasi sempre in tracce (Tabella 3.3), eccetto per i campioni BAS4 e BAS25 dove rispettivamente rappresenta l'11.6% ed il 5.1% dello scheletro.

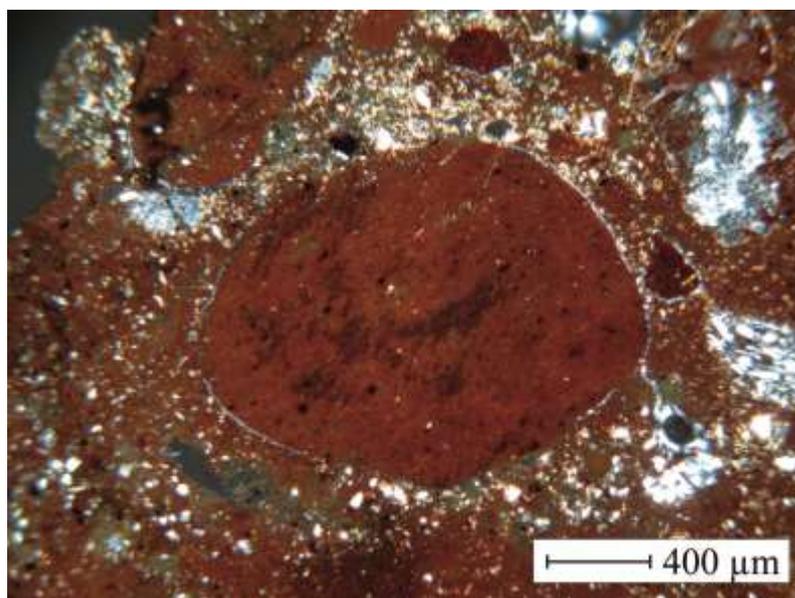


Figura 4.26 Micro-foto eseguita al microscopio ottico polarizzatore a nicol incrociati di *chamotte* presente nel campione BAS16.

Lo scheletro dei campioni (definito in con il termine di “non-plastic inclusions”) (Tabella 3.2) mostra sfericità variabili da basse ad alte, mentre il *sorting* dello scheletro risulta variabile da “poorly sorted” a “well sorted” (Jerram, 2001; Boggs, 2010). In genere, la granulometria media dello scheletro di tutti i campioni è quella delle sabbie, variabili da fini a grossolane, eccetto per il campione BAS29 in cui si rileva una “Wentworth Size” (1922) “coarse silt”.

In genere i rapporti “matrice/non plastic inclusions” variano da un minimo di 2.3 del campione BAS19 ad un massimo di 28.2 del campione BAS6.

4.3.4 Relazione tra fasi costruttive e composizione dei laterizi

Le ricerche bibliografiche (Emerson et al., 1950; Fossati, 1890; Hoffmann, 1999; Kinross, 1974; Mainstone, 1999, 2009; Van Nice, 1965) hanno consentito di

attribuire, in prima analisi, un'epoca costruttiva differente alle murature realizzate con i laterizi oggetto di studio a seconda dell'area di campionamento. In Tabella 4.4 sono riportate le datazioni dei campioni attribuite su base bibliografica (Mainstone, 1999; 2009).

	Probabile datazione basata su studi storici (Secolo)
BAS1	VI
BAS2	VI
BAS3	X
BAS4	VI
BAS5	VI
BAS6	VI
BAS7	VI
BAS8	VI
BAS9	VI
BAS10	VI
BAS11	XIV
BAS12	VI
BAS13	VI
BAS14	VI
BAS15	VI
BAS16	VI
BAS17	IV
BAS18	IV
BAS19	V
BAS20	V
BAS21	V
BAS22	IV
BAS23	VI
BAS24	XIV
BAS25	VI
BAS26	XIV
BAS27	XIV
BAS28	X
BAS29	X

Tabella 4.4 Campioni di laterizio prelevati dall'edificio di Hagia Sophia con relativa tipologia e probabile datazione derivante da studi di tipo storico-architettonico (Mainstone, 1999;2009).

Riassumendo, è possibile suddividere i laterizi in 5 gruppi in base alla loro probabile fase costruttiva. I campioni più antichi sono relativi al IV secolo (BAS17, BAS18, BAS22); successivamente vi sono i campioni appartenenti al V secolo (BAS19, BAS20, BAS21), i campioni appartenenti al VI secolo (BAS1, BAS2, BAS4, BAS5, BAS6, BAS7, BAS8, BAS9, BAS10, BAS12, BAS13, BAS14, BAS15, BAS16, BAS23, BAS25), quelli appartenenti al X secolo (BAS3, BAS28, BAS29) e quelli del XIV secolo (BAS11, BAS24, BAS26, BAS27).

Poiché, in prima analisi, come si evince dalle discussioni precedenti, non si osservano forti differenze composizionali tra i campioni, si è cercato di verificare se è possibile apprezzare piccole, ma significative, variazioni chimico-composizionali legate alle diverse epoche costruttive. Attribuendo lo stesso simbolo ai campioni appartenenti alla stessa epoca e studiando i vari campioni attraverso l'utilizzo di diagrammi binari, è possibile fare alcune considerazioni.

Nel diagramma CaO vs SiO₂ (Fig. 4.27) appare evidente una significativa differenziazione correlata alle differenti fasi costruttive, in cui tuttavia i campioni del VI e del XIV secolo si sovrappongono perfettamente.

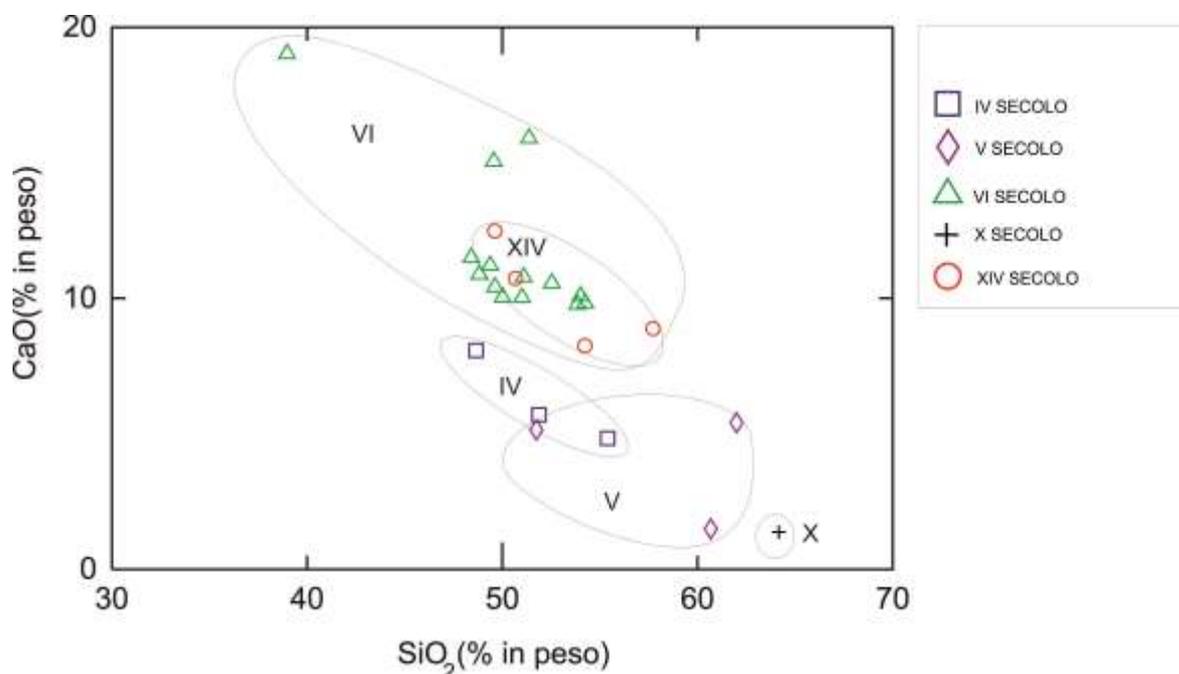


Figura 4.27 Diagramma CaO vs SiO₂.

In linea di massima la concentrazione media di CaO decresce dai campioni del VI e XIV secolo sino ad arrivare al campione BAS3 appartenente al X secolo. I campioni del IV e V secolo, invece, mostrano un contenuto in CaO intermedio.

Le stesse considerazioni possono essere effettuate osservando il diagramma Fe_2O_3 vs TiO_2 (Fig. 4.28) in cui si vede abbastanza bene come il contenuto di TiO_2 cresce dai campioni del VI e XIV secolo verso il campione del X secolo.

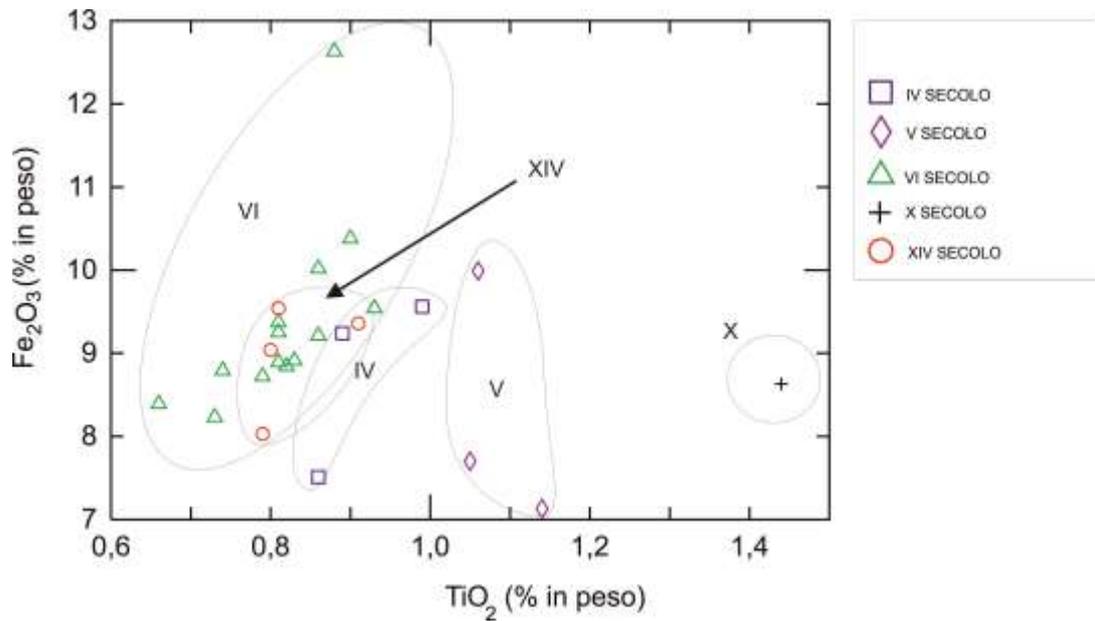


Figura 4.28 Diagramma Fe_2O_3 vs TiO_2 .

I diagrammi CaO vs K_2O (Fig. 4.29) e TiO_2 vs CaO (Fig. 4.30) mostrano ancor meglio la netta separazione chimica tra i campioni delle diverse epoche.

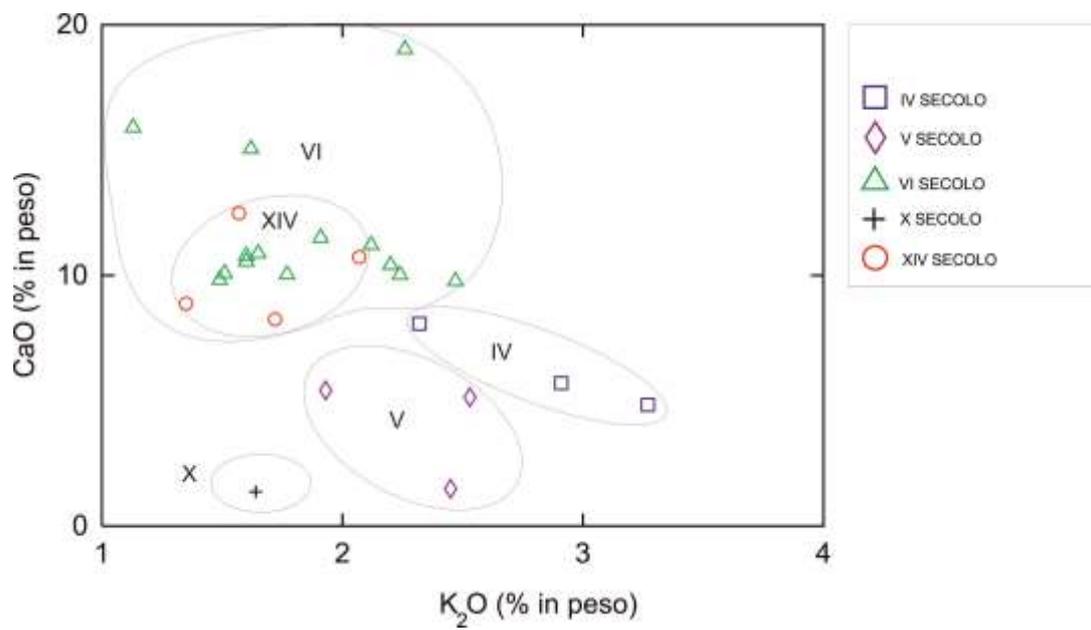


Figura 4.29 Diagramma CaO vs K₂O.

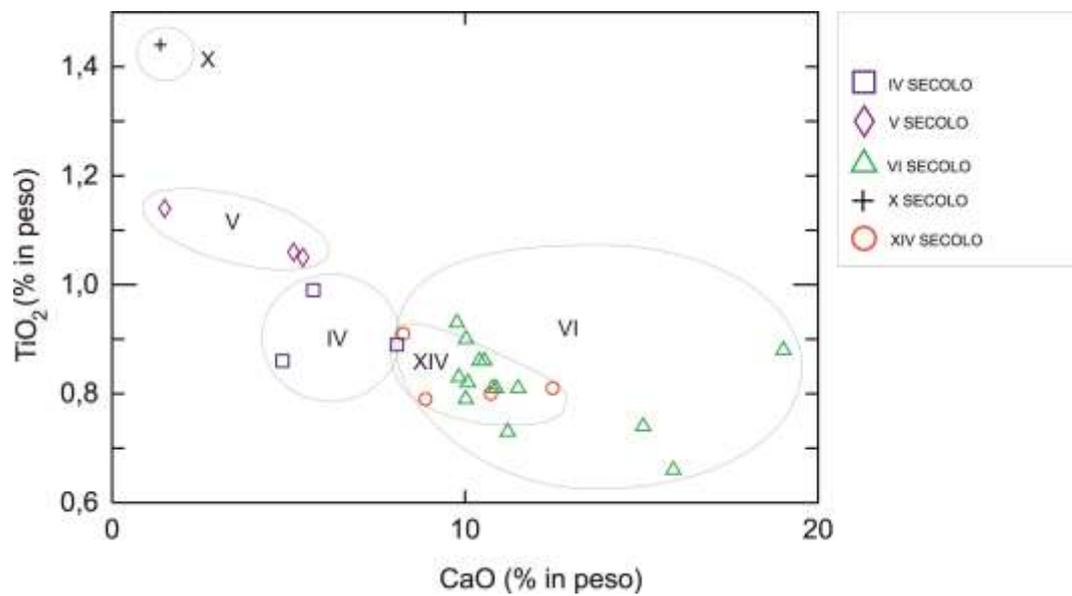


Figura 4.30 Diagramma TiO₂ vs CaO.

Considerando gli elementi in tracce è possibile osservare la stessa suddivisione, visibile in particolare nel diagramma Sr vs Zr in Fig. 4.31.

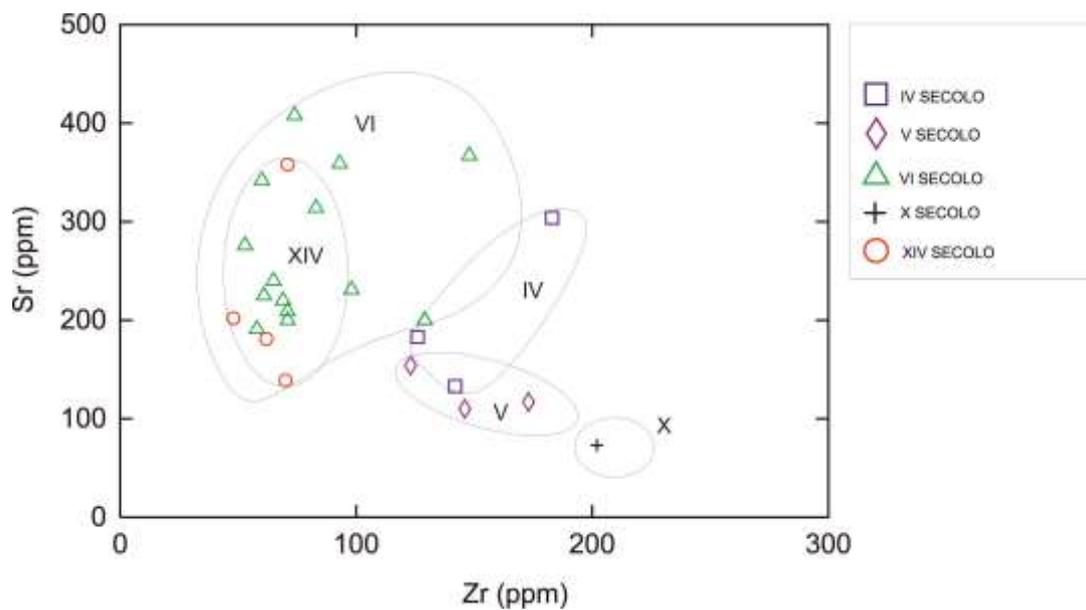


Figura 4.31 Diagramma Sr vs Zr.

Poiché i campioni, attribuiti in prima analisi al XIV secolo, si sovrappongono totalmente a quelli del VI, è probabile supporre che nella ricostruzione delle murature del XIV secolo siano stati riutilizzati laterizi preparati nel VI secolo. Effettuando un'analisi dei componenti principali, eseguita considerando simultaneamente tutti gli ossidi degli elementi chimici maggiori, eccetto P_2O_5 e il LOI, trasformati in CLR (Centered Log Ratio) sul modello di Aitchison (Aitchison, 1982-1983-1986), è possibile confermare ancora una volta la forte correlazione tra la composizione chimica dei campioni e le relative fasi costruttive (Fig. 4.32).

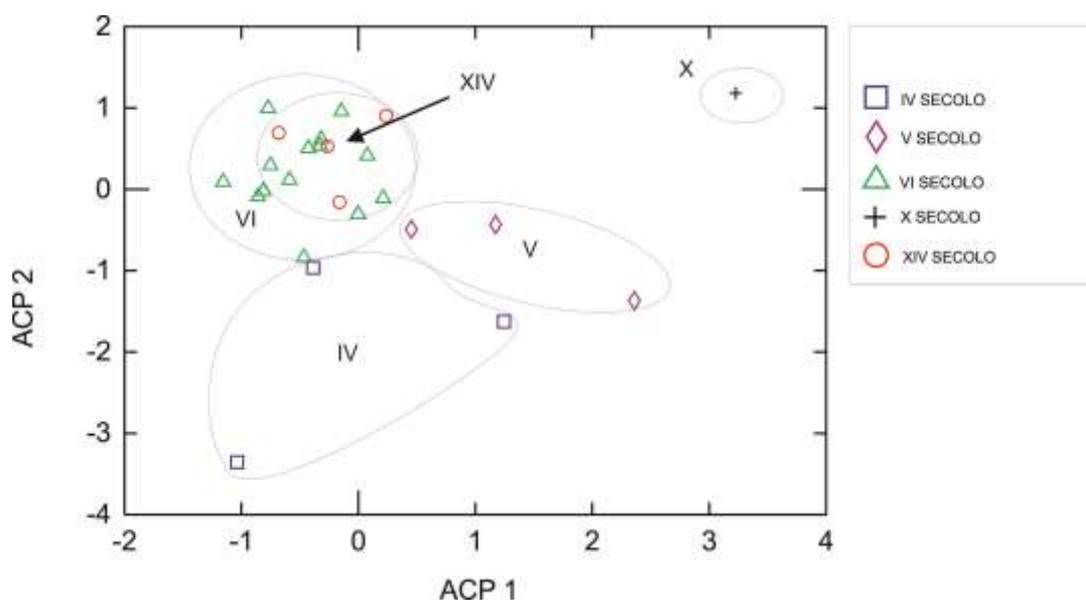


Figura 4.32 Grafico in cui sono riportate le due componenti principali (ACP).

Prima di procedere con la discussione dei dati è bene ricordare come dei campioni BAS23, BAS25, BAS28 e BAS29 non è stato possibile eseguire le analisi XRF a causa dell'esigua quantità di materiale a disposizione; tuttavia per gli stessi è stato possibile realizzare le relative sezioni sottili e quindi effettuare le analisi microscopiche a luce polarizzata trasmessa, le microanalisi SEM-EDS, le analisi XRPD e le analisi termogravimetriche.

Per evidenziare maggiormente le differenze chimico-composizionali tra i campioni appartenenti alle varie fasi è stata utilizzata l'analisi discriminante.

Ipotizzando che i campioni attribuiti al XIV secolo siano stati preparati nel VI secolo e riutilizzati nel XIV secolo. A questi campioni attribuiremo da ora in poi lo stesso simbolo (quello relativo al VI secolo).

Effettuando una prima analisi discriminante attraverso l'utilizzo delle variabili quantitative ricavate in microscopia ottica mediante l'analisi modale (Tabella 3.3), è possibile notare una leggera sovrapposizione tra i campioni del VI, del IV e del V secolo (Fig. 4.33), mentre i campioni del X secolo si discostano nettamente dagli altri.

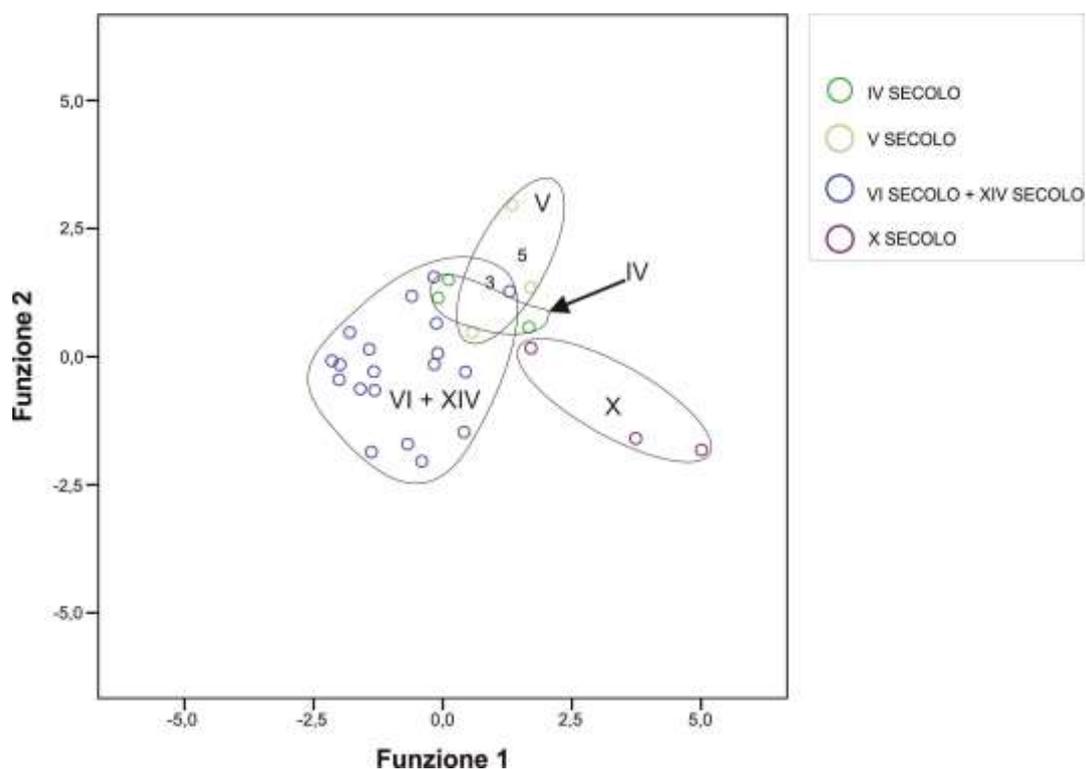


Fig. 4.33 Analisi discriminante dei laterizi eseguita utilizzando i dati dell'analisi modale (Tabella 3.3).

Ciò suggerisce che le caratteristiche tessiturali dei laterizi (caratteristiche modali) sono piuttosto omogenee; infatti le differenze più eclatanti tra i vari gruppi sono da attribuire, non tanto alle caratteristiche dello scheletro, quanto alla composizione chimica delle argille utilizzate come materia prima, molto probabilmente diverse nelle altrettante fasi costruttive. Si cercherà di verificare tale ipotesi, successivamente, attraverso e dati della microanalisi SEM-EDS dei campioni.

Anche l'analisi discriminante eseguita utilizzando i dati delle perdite in peso ricavati dall'analisi termogravimetrica (Tabella 3.10), mostra una netta suddivisione dei campioni correlata con le differenti fasi costruttive (Fig. 4.34).

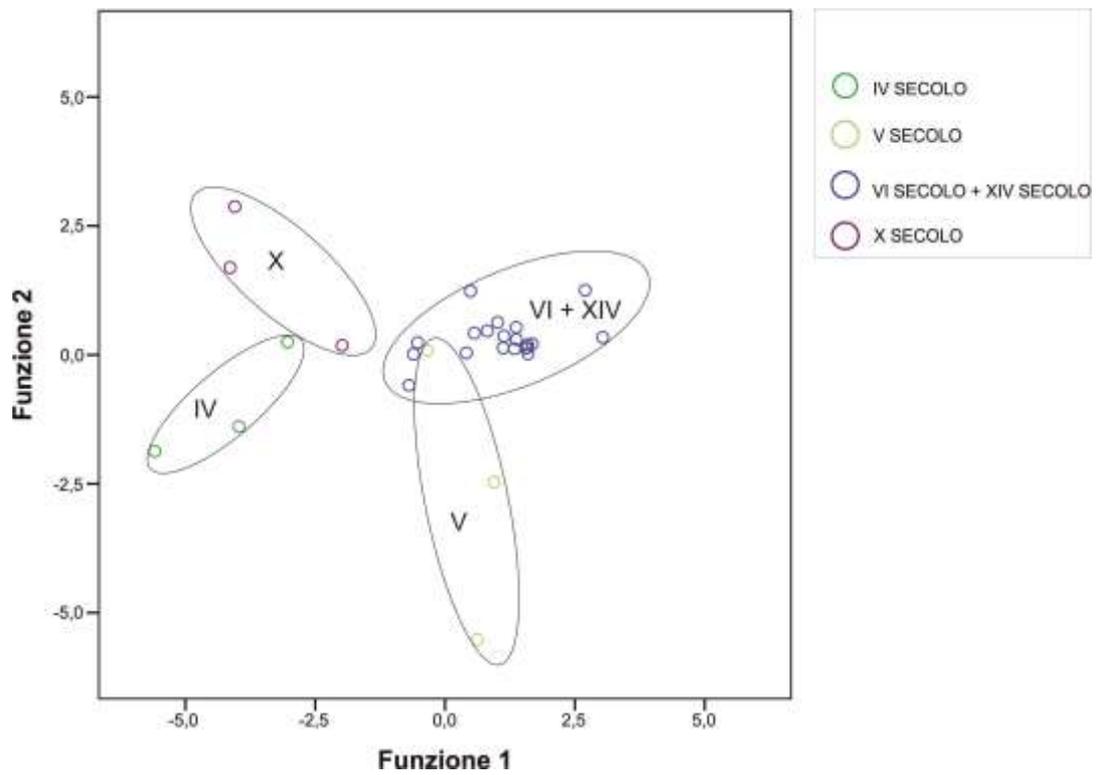


Fig. 4.34 Analisi discriminante dei laterizi eseguita utilizzando i dati dell'analisi termogravimetrica (Tabella 3.10).

La stessa netta suddivisione dei gruppi si osserva attraverso l'analisi discriminante eseguita utilizzando i dati XRF degli elementi maggiori (Fig. 4.35) e degli elementi in tracce (Fig. 4.36).

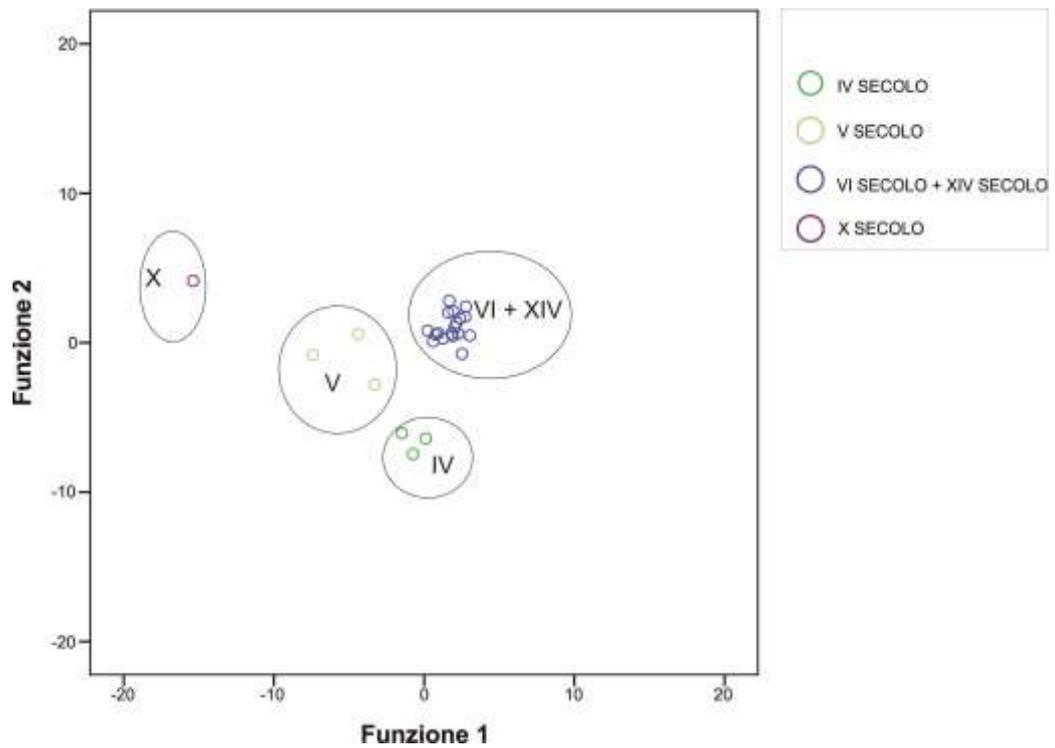


Fig. 4.35 Analisi discriminante dei laterizi eseguita utilizzando i dati XRF relativi alla concentrazione degli elementi maggiori (Tabella 3.5).

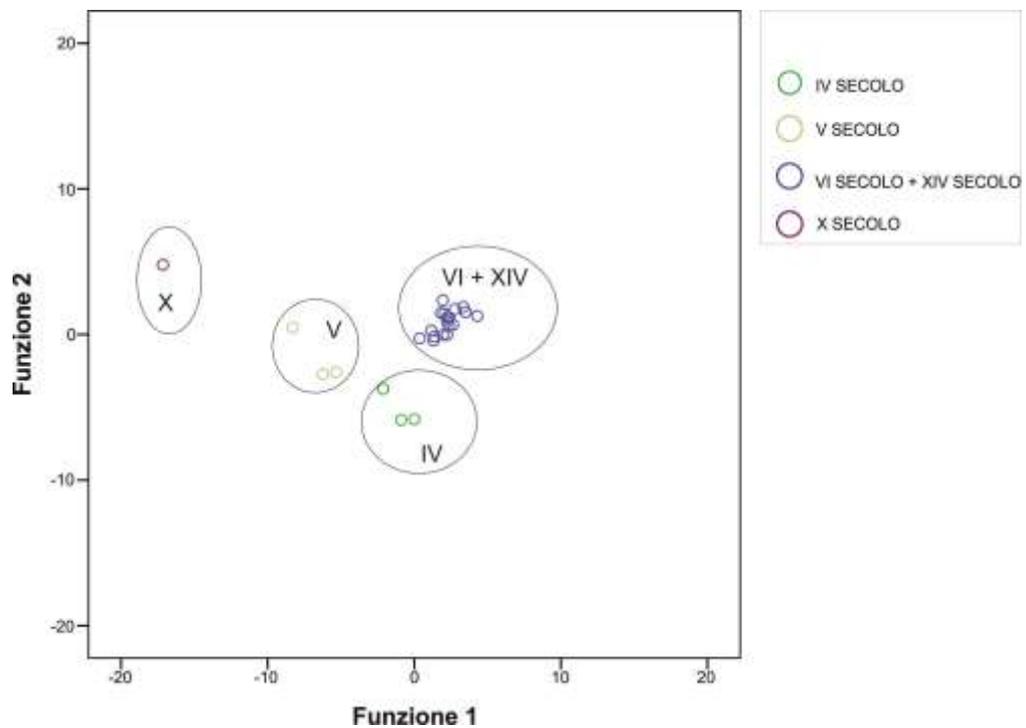


Fig. 4.36 Analisi discriminante dei laterizi eseguita utilizzando i dati XRF relativi alla concentrazione degli elementi in tracce (Tabella 3.6).

Per avvalorare l'ipotesi formulata precedentemente che prevede l'utilizzo di argille di composizione diversa nelle differenti fasi costruttive, è stata messa a punto una metodologia analitica (vedi paragrafo 3.6), basata sulla microanalisi EDS (Taranto et al., 2019), che consente di confrontare aree omogenee (cioè prive di scheletro) dei vari campioni. Utilizzando, quindi, i dati microchimici EDS di ciascun campione relativi agli elementi maggiori, è stata effettuata un'ulteriore analisi discriminante (Fig. 4.37).

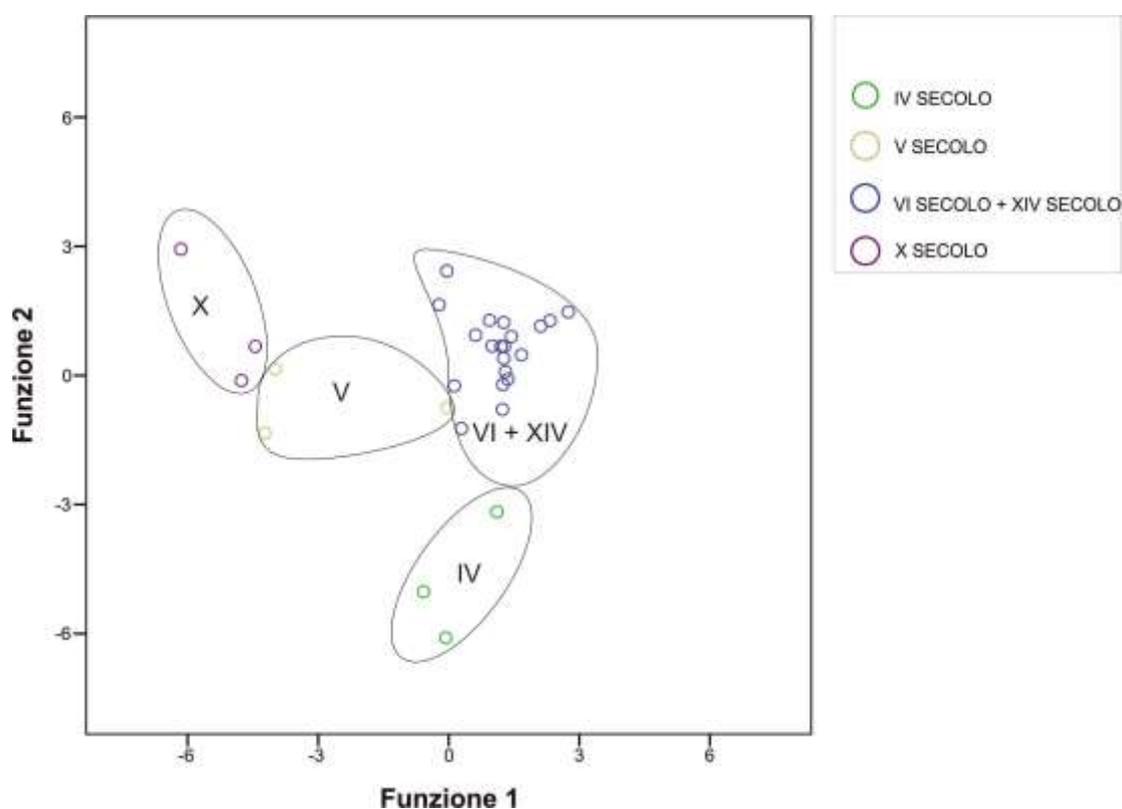


Fig. 4.37 Analisi discriminante dei laterizi eseguita utilizzando i valori medi degli elementi maggiori ricavati dai dati microchimici SEM-EDS (Tabella 3.8).

Il grafico mostrato in Figura 4.37 mostra chiaramente che per ciascuna fase costruttiva sono state utilizzate almeno 4 tipologie di argille provenienti o da formazioni geologiche diverse o dalla stessa formazione, ma campionate verticalmente in corrispondenza di orizzonti differenti. Per avvalorare l'una o l'altra ipotesi sarà opportuno in futuro eseguire un campionamento delle formazioni

argillose presenti nei dintorni di Istanbul, studiarne le caratteristiche geochimiche e confrontarle con quelle relative ai campioni studiati nel presente lavoro.

Un tentativo di identificare la provenienza di alcuni laterizi utilizzati per la costruzione di Hagia Sophia è stato eseguito da Moropoulou et al. (2002b); per alcuni di essi è stata indicata la provenienza da Rodi, attraverso un confronto eseguito su base composizionale tra alcuni laterizi di sicura provenienza rodiana (Basilica di Rodi) e alcuni laterizi campionati in Hagia Sophia. Le variabili usate da Moropoulou et al. (2002b), sono la CO₂ e l'acqua strutturale (Fig. 4.38) facilmente calcolabili dall'analisi termogravimetrica.

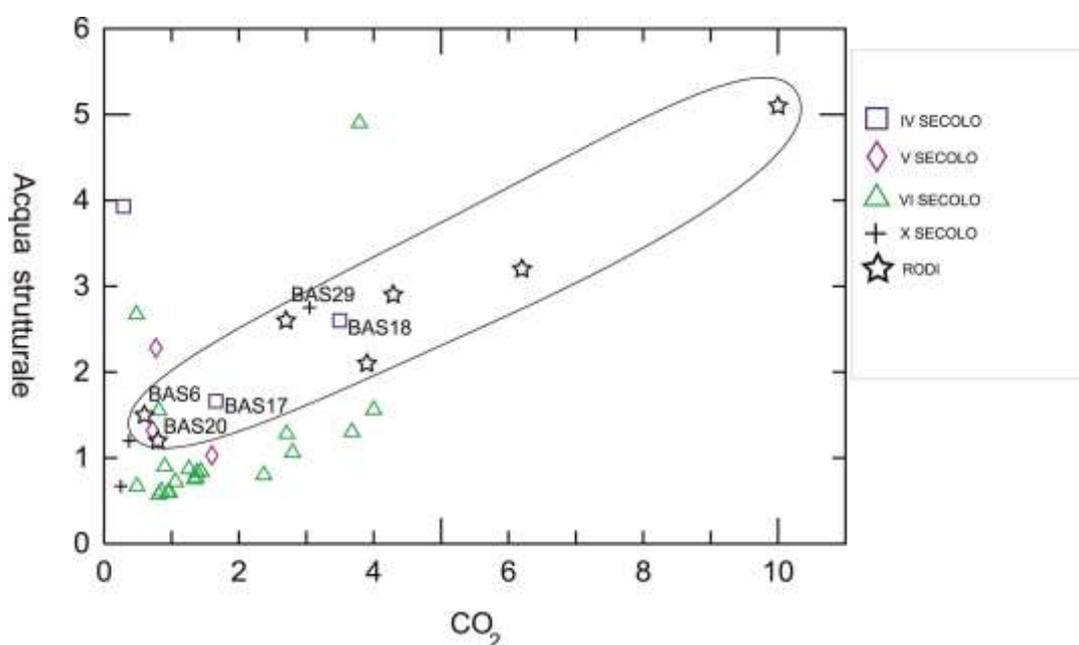


Fig. 4.38 Diagramma binario CO₂ vs Acqua strutturale ottenute mediante analisi termogravimetrica (Tabella 3.11).

Nel grafico mostrato in Figura 4.38 sono stati confrontati alcuni laterizi provenienti da Rodi (Moropoulou et al., 2002b) e i laterizi studiati nel presente lavoro. Appare subito chiaro che il campo composizionale dei laterizi di Rodi mostra un'elevata variabilità, che, in linea generale, si discosta da quello dei laterizi di Hagia Sophia, eccetto per i campioni BAS6, BAS17, BAS18, BAS20 e BAS29 (Fig. 4.38). Tuttavia questa apparente analogia non è affatto robusta; infatti

l'osservazione dei laterizi di Hagia Sophia in sezione sottile, ha rivelato, per molti di essi, la presenza di calcite secondaria nei micro-pori. Ciò non fa altro che spostare i campioni di Hagia Sophia verso il campo composizionale dei campioni di Rodi, a causa del contenuto elevato di CO₂ riconducibile alla presenza di calcite secondaria. Si può quindi concludere che per i campioni studiati in questo lavoro non sono stati utilizzati laterizi prodotti con materie prime di Rodi. Tuttavia questa resta un'ipotesi da approfondire in futuro attraverso la comparazione dei laterizi, studiati in questo lavoro, con le argille provenienti da Rodi e con quelle affioranti nei dintorni di Istanbul; purtroppo tali dati attualmente non sono disponibili in letteratura.

CONCLUSIONI

Come enunciato all'inizio di questo lavoro, lo studio in oggetto ha avuto come obiettivi:

1. il miglioramento del sistema GIS3D implementato in un precedente progetto di ricerca (Cura, 2016), attraverso la creazione di un guscio esterno tridimensionale, costruito sulla base delle tavole disegnate da Robert J Van Nice (Van Nice, 1965);
2. la creazione di una procedura GIS che consenta di inserire nel modello tridimensionale dati numerici, opportunamente normalizzati, in grado di connetterli tra loro nelle tre dimensioni;
3. la caratterizzazione compositiva dei laterizi prelevati dalle murature di Hagia Sophia.

Per lo studio eseguito su Hagia Sophia sono state utilizzate differenti tecniche e metodologie. Di seguito sono riassunti i risultati raggiunti.

- Per la prima volta, utilizzando le tavole di Van Nice, è stato realizzato un modello tridimensionale di Hagia Sophia basato sulle misurazioni storiche. Tuttavia, le tavole realizzate da Van Nice non sono state sufficienti a coprire tutta la superficie esterna di Hagia Sophia. Tali lacune sono state integrate utilizzando dati fotogrammetrici ricavati da drone, dati fotografici ottenuti da terra e dati lidar ricavati da acquisizioni mediante laser scanner (Cura, 2016). La sovrapposizione tra il volume di Hagia Sophia, ottenuto dai prospetti storici, con il volume ricavato mediante laser scanner, è risultato geometricamente comparabile. Ciò ha consentito di appurare, ancora una volta (Mainstone, 1969, 1999, 2009; Mark et al., 1993; Koçak & Köksal, 2010; Schibille, 2016) la qualità del lavoro di Van Nice, che negli anni 60 realizzò i prospetti attraverso tecniche tradizionali di rilievo topografico. Laddove presenti, i prospetti storici, sono ricchi di dettagli; inoltre, da un

punto di vista geometrico, le distanze tra gli elementi dei vari corpi di fabbrica sono ampiamente rispettate.

- Generalmente, i sistemi GIS, consentono di interpolare dati geolocalizzati per estrarre nuove informazioni che arricchiscono i dati preesistenti. Le interpolazioni in ambiente GIS rappresentano il processo con cui si utilizzano dati con valori noti per stimare ulteriori valori in punti sconosciuti, operazione che viene sempre effettuata nelle due dimensioni; invece, in questo lavoro, utilizzando differenti software (Bentley Pointools, Matlab, Terraexplorer Pro), è stato possibile ottenere un'interpolazione tridimensionale di variabili numeriche. Per testare tale possibilità, applicabile ad ogni tipo di dato, è stata simulata, in modo virtuale, la distribuzione della temperatura all'interno di un parallelepipedo coincidente con la navata centrale di Hagia Sophia. La matrice 3D ottenuta è stata quindi interpolata lungo le tre dimensioni e georiferita in ambiente GIS. A questo punto è possibile selezionare e visualizzare un qualsiasi piano passante per il volume noto, ottenendo per lo stesso la distribuzione della variabile temperatura lungo il piano. Se si immagina, in futuro, di applicare questa tecnica a variabili composizionali correlate al degrado della struttura (es. la concentrazione dei sali solubili in un volume), si prospetta la possibilità di realizzare modelli previsionali del rischio di degrado delle varie strutture, consentendo di pianificare eventuali interventi di restauro. Naturalmente tale metodologia potrà essere applicata anche per la risoluzione di problematiche di tipo archeometrico (Landeschi, 2018).
- Per quanto concerne lo studio composizionale dei laterizi di Hagia Sophia, le indagini chimiche, mineralogiche e petrografiche eseguite sui campioni, hanno consentito di ottenere i seguenti risultati.
 - I vari campioni, apparentemente molto omogenei tra di loro dal punto di vista minero-petrografico, mostrano invece delle differenze composizionali significative per quanto riguarda la matrice fine dei laterizi correlate alla natura delle argille utilizzate per la loro produzione; infatti, un

protocollo analitico basato sulla microanalisi SEM-EDS di aree omogenee e prive di scheletro, implementato appositamente per questo lavoro, ha consentito di stabilire che per ogni fase costruttiva è molto probabile che siano state utilizzate argille di composizione diversa, raggruppando i campioni in quattro insiemi composizionalmente simili (campioni del IV sec., campioni del V sec., campioni del VI+XIV sec. e campioni del X sec.).

- Grazie agli studi composizionali, si è fatta strada l'ipotesi di similitudini tra i gruppi di laterizi attribuiti a differenti fasi costruttive che hanno interessato la struttura tra il VI ed il XIV secolo (Taranto et al., 2019). I laterizi, preliminarmente ritenuti appartenenti ad una muratura costruita sicuramente intorno al XIV sec., si è visto essere in realtà laterizi prodotti nel VI secolo e riutilizzati durante il restauro del XIV secolo; infatti, differenti studi bibliografici (Mainstone, 2009; Moropoulou et al., 2002b; Cappa et al., 2016; Cura et al., 2016; Miriello et al., 2017) riportano che le murature di Hagia Sophia del XIV secolo risultano prossime alle murature del VI secolo; appare quantomeno plausibile che durante la ricostruzione del XIV secolo, occorsa a seguito di un evento sismico (Charanis, 1938; Cutler, 1968; Mainstone, 2009), possano essere stati riutilizzati laterizi ancora integri del VI secolo, venuti giù durante un evento sismico

- Per quanto riguarda la provenienza delle materie prime argillose utilizzate per la produzione dei laterizi di Hagia Sophia, l'ipotesi di una probabile provenienza da Rodi, avanzata dallo studio di Moropoulou et al. (2002b) e dimostrata dalla Moropoulou stessa per alcuni laterizi campionati nella parte interna di Hagia Sophia, non ha trovato riscontro con i laterizi studiati nel presente lavoro. Gli unici dati composizionali, che è possibile utilizzare per confrontare i laterizi del presente lavoro con le probabili aree di approvvigionamento delle materie prime, riguardano i dati derivanti dalle analisi termogravimetriche dei laterizi di Rodi (Moropoulou et al., 2002b). In bibliografia, inoltre, non sono presenti dati composizionali derivanti dallo studio di argille nei dintorni di Istanbul o di Rodi. Il confronto tra i valori

ottenuti dalle analisi termogravimetriche (Acqua strutturale vs CO₂) per i campioni studiati in questo lavoro e quelli pubblicati sui laterizi di Rodi (Moropoulou et al., 2002b), ha mostrato un'elevata variabilità composizionale di questi ultimi che, in linea di massima, si discosta da quella dei laterizi studiati. Statisticamente si evidenzia una maggiore affinità tra i campioni di Hagia Sophia e quelli di Rodi solo per 5 dei 29 campioni studiati (BAS6, BAS17, BAS18, BAS20 e BAS29); tale affinità è comunque apparente, poiché è da attribuire alla presenza di calcite secondaria nei laterizi di Hagia Sophia. Quindi, in prima analisi, è possibile escludere che i laterizi studiati siano stati prodotti con materie prime di Rodi, mentre è più plausibile una provenienza locale delle materie prime. Tale ipotesi, tuttavia, resta da confermare, attraverso un approfondito studio composizionale delle argille presenti nei dintorni di Istanbul.

BIBLIOGRAFIA

Achenza M., Atzeni C., Mocci S., Sanna U. (2008). Il manuale tematico della terra cruda: caratteri, tecnologie, buone pratiche. ITACA, Sassari.

Aitchison J. (1982). The statistical analysis of compositional data (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Statistical Methodology)* 44, 139-177.

Aitchison J. (1983). The Principal component analysis of compositional data. *Biometrika* 70, 57-65.

Aitchison J. (1986). The statistical analysis of compositional data. In: *Monographs on Statistics and Applied Probability*. Chapman & Hall Ltd, London.

Atatürk K., Akşit, İ. (1998). Mustafa Kemal Atatürk. Akşit Kultur Turizm Limited Sirketi. Istanbul.

Albouy, B., Koenig, E., Treuillet, S., & Lucas, Y. (2006, September). Accurate 3D structure measurements from two uncalibrated views. In *International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems* (pp. 1111-1121). Springer, Berlin, Heidelberg.

Altmann M. (2002). About Nonuniform Rational B-Splines–NURBS. Worcester Polytechnic Institute, USA.

Barba L., Blancas J., Pecci A., Miriello D., Cura M., Crisci G. M., Cappa M., De Angelis D., Yavuz H. B. (2018). Georadar investigations in the central nave of Hagia Sofia, Istanbul (Turkey). *Archaeological and Anthropological Sciences*, 10(2), 259-268.

Bastonero, P., Donadio, E., Spanò, A., & Chiabrando, F. (2014). Fusion of 3D models derived from TLS and image-based techniques for CH enhanced documentation. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2(5).

Beste H. J., Filippi D. (2015). *Archeologia dell'Architettura*, XX. Atti Workshop (pp. 60-64).

Boggs S. Jr. (2010). *Petrology of sedimentary rocks*; Cambridge University Press. Cambridge UK.

Boriani M. (2007). Between westernization and orientalism: italian architects and restorers in Istanbul from the 19th century to the beginning of the 20th. *Architecture*, (1), 71-91.

Buonfiglio M. (2015). L'utilizzo di laterizi nella costruzione augustea del Teatro di Marcello. *Archeologia dell'Architettura*, XX, 2015–Il laterizio nei cantieri imperiali. Roma e il Mediterraneo. Atti del I workshop "Laterizio"(Roma, 27-28 novembre 2014) (p. 13). All'Insegna del Giglio.

Brewer C. A., MacEachren A. M., Pickle L. W., Herrmann D. (1997). Mapping mortality: Evaluating color schemes for choropleth maps. *Annals of the Association of American Geographers*, 87(3), 411-438.

Burrough P.A. (1986). *Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment*. Clarendon Press. Oxford.

Cappa M., De Angelis D., Pecci A., Barba L., Cura M., Crisci G. M., Blancas J., Yavuz H. B., Miriello D. (2016). Thermographic survey at Hagia Sophia: main

arches, pendentives and tympana. *International Journal of Architectural Heritage*, 10(6), 726-734.

Cesaretti P., Fobelli M. L. (2011). *Santa Sofia di Costantinopoli: un tempio di luce (De aedificis Iustiniani I 1, 1-78) (Vol. 45)*. Jaca Book. Milano.

Chang K. T. (2018). *Geographic information system*. McGraw-Hill Higher Education. Usa.

Charanis P. (1938). *Les βραχέα χρονικά comme source historique*. *Byzantion*, 13(1), 335-362.

Chen C. S., Hung Y. P., Cheng J. B. (1999). RANSAC-based DARCES: A new approach to fast automatic registration of partially overlapping range images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 21(11), 1229-1234.

Chunye W., Delu P. (2017). Zoning of Hangzhou Bay ecological red line using GIS-based multi-criteria decision analysis. *Ocean & coastal management*, 139, 42-50.

Cohen T. (2015) *Hagia Sophia*. *Ancient History Encyclopedia*. United Kingdom.

Crowley R. (2009). *Constantinople: The Last Great Siege 1453*. Faber and Faber 2009. United Kingdom.

Cura M. (2016). *Costruzione di un database GIS 3D per un approccio multidisciplinare alla diagnostica di Santa Sofia (Istanbul - Turchia)*. Tesi dottorato Università della Calabria.

Cutler A. (1968). The De Signis of Nicetas Choniates. A Reappraisal. *American Journal of Archaeology*, 72(2), 113-118.

Dankoff R. (2004). *An Ottoman Mentality: The World of Evliya Çelebi*. Brill. Leiden.

Di Caprio N. C., Sarah J. V. (1993). An experimental study in distinguishing grog (chamotte) from argillaceous inclusions in ceramic thin sections, *Archeomaterials* 7.1: 21-40.

Di Caprio N. C. (2007). *La ceramica in archeologia, 2: antiche tecniche di lavorazione e moderni metodi di indagine (Vol. 2)*. L'Erma di Bretschneider. Roma.

Emerson W., Van Nice R. L. (1950). Hagia Sophia and the First Minaret Erected after the Conquest of Constantinople. *American Journal of Archaeology*, 54(1), 28-40.

Emerson W., Van Nice R. L. (1951). Hagia Sophia: The construction of the second dome and its later repairs. *Archaeology*, 4(3), 162-171.

Earl G., Martinez K., Malzbender T. (2010). Archaeological applications of polynomial texture mapping: analysis, conservation and representation. *Journal of Archaeological Science*, 37(8), 2040-2050.

Erdik M., Croci G. (2010). Earthquake performance of Hagia Sophia: a review of investigations. *Annual of Hagia Sophia Museum*, 13, 101-134.

Fisher R. A. (1938). The statistical utilization of multiple measurements. *Annals of eugenics*, 8(4), 376-386.

Fisher H. T. (1978). Thematic Cartography – what it is and what is different about it. Harvard papers in theoretical cartography. Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis, Harvard.

Fossati G. (1890). Rilievi storico-artistici sulla architettura bizantina dal 4. al 15. e fino al 19. secolo, ovvero notizie intorno alle scoperte fatte in Santa Sofia a Costantinopoli dagli architetti Giuseppe e Gaspare Fossati: cenni illustrativi delle opere esposte dal superstite architetto Giuseppe Fossati ... / \Giuseppe Fossati!. Tip. Bernardoni di C. Rebeschini e C. Milano.

Franco L. (2013). Vita di Costantino, trascrizione di Cesarea, E. Bur. Milano.

Gibbon E. (1872). Storia della decadenza e rovina dell'impero romano. G. Barbèra. Firenze.

Gigante G. E., Ridolfi S. (2015). La tecnica della Fluorescenza a raggi x. consultato on-line dal sito [http://www.sbai.uniroma1.it/~giovanni.gigante/Materiale_didattico/La% 20Fluorescenza% 20dei% 20raggi% 20x. pdf](http://www.sbai.uniroma1.it/~giovanni.gigante/Materiale_didattico/La%20Fluorescenza%20dei%20raggi%20x.pdf) in data, 12(1).

Goldstein J. I., Newbury D. E., Michael J. R., Ritchie N. W., Scott J. H. J., Joy D. C. (2017). Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. Springer.

Goodchild M. F., Yuan M., Cova T. J. (2007). Towards a general theory of geographic representation in GIS. International journal of geographical information science, 21(3), 239-260.

Gregorae N. (1562). trascriz. Joannem Oporinum. Romana hoc est byzantia historia, 534 pp.

Gros P. (1997). Vitruvio, de architectura, traduzione e commento di Antonio Corso e Elisa Romano. Einaudi. Torino.

Guidobaldi A. G., Barsanti C. (2009). Le porte e gli arredi architettonici in bronzo della Santa Sofia di Costantinopoli. Le porte del paradiso: Arte e tecnologia bizantina tra Italia e Mediterraneo, 11-12.

Jenks G. F. (1977). Optimal data classification for choropleth maps. Department of Geography, University of Kansas Occasional Paper.

Jerram D.A. (2001). Visual comparators for degree of grain-size sorting in two and three-dimensions. *Computers & Geoscience*. 27, 485-492.

Johnson, A. E., & Kang, S. B. (1999). Registration and integration of textured 3D data. *Image and vision computing*, 17(2), 135-147.

Hamlin A. D. F. (1915). *College Histories of Art History of Architecture*. New York, NY: Longmans.

Harris J. (2013). *La fine di Bisanzio*. Società editrice il Mulino. Bologna.

Haskin L. A., Wang A., Rockow K. M., Jolliff B. L., Korotev R. L., Viskupic K. M. (1997). Raman spectroscopy for mineral identification and quantification for in situ planetary surface analysis: A point count method. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 102(E8), 19293-19306.

Hodgkiss A. G. (1981). *Understanding Maps: a systematic history of their use and development*. Dawson Publishing. Usa.

Hoffmann V. (1999). *Santa Sofia ad Istanbul: sei secoli di immagini e il lavoro di restauro di Gaspare Fossati (1847-49): catalogo dell'esposizione, Casa del mantegna, Mantova, 14 novembre-31 dicembre 1999*. Casa del Mantegna.

Hoffmann V., Theocharis N. (2016). *Hagia Sophia 3D*. Edition Topoi. Berlin.

Höhne K. H., Fuchs H., Pizer S. M. (Eds.). (2012). 3D imaging in medicine: algorithms, systems, applications (Vol. 60). Springer Science & Business Media.

Horowitz, H. H., & Metzger, G. (1963). A new analysis of thermogravimetric traces. *Analytical Chemistry*, 35(10), 1464-1468.

Inoue K., Shimada K., Chilaka K. (2003). Solid model reconstruction of wireframe CAD models based on topological embeddings of planar graphs. *Journal of Mechanical Design*, 125(3), 434-442.

Kenyon K. (1954). Excavations at Jericho. *The Journal of the Royal Anthropological Institute of Great Britain and Ireland*, 84(1/2), 103-110

Kinross J. (1974). SANTA SOFIA. Mondadori editore. Milano.

Klančnik G., Medved J., Mrvar P. (2010). Differential thermal analysis (DTA) and differential scanning calorimetry (DSC) as a method of material investigation Diferenčna termična analiza (DTA) in diferenčna vrstična kalorimetrija (DSC) kot metoda za raziskavo materialov. *RMZ–Materials and Geoenvironment*, 57(1), 127-142.

Koçak A., Köksal T. (2010). An example for determining the cause of damage in historical buildings: Little hagia sophia (Church of St. Sergius and Bacchus)–Istanbul, Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 17(4), 926-937.

Landeschi G. (2018). Rethinking GIS, three-dimensionality and space perception in archaeology. *World Archaeology*, 1-16.

Le Maitre R., Streckeisen A., Zanettin B., Le Bas M., Bonin B., & Bateman P. (Eds.). (2002). *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms, Recommendations of the International Union of Geological Sciences*,

Subcommission of the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge University Press, Cambridge.

Leonard R. J., Herron, R. H. (1972). Significance of Oxidation-Reduction Reactions within BOF Refractories. *Journal of the American Ceramic Society*, 55: 1–6.

Lezzerini M., Tamponi M., Bertoli M. (2013): Reproducibility, precision and trueness of X-ray fluorescence data for mineralogical and/or petrographic purposes. *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat. Mem., Serie A*, 120: 67-73.

Lezzerini M., Tamponi M., Bertoli M. (2014): Calibration of XRF data on silicate rocks using chemicals as in-house standards. *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem., Serie A*, 121: 65-70.

Limberis V. (2002). *Divine Heiress: The Virgin Mary and the Making of Christian Constantinople*. Routledge. Oxford.

Maiman T. H. (1960). *Stimulated optical radiation in ruby*. Pergamon Press. Oxford.

Mainstone R. J. (1969). The reconstruction of the tympana of St. Sophia at Istanbul. *Dumbarton Oaks Papers*, 23, 353-368.

Mainstone R. J. (1999). *Structure in architecture: history, design and innovation*. Ashgate. United Kingdom.

Mainstone R. J. (2009). *Santa Sofia*. Electa. Milano.

Majeska G. P. (1973). *St. Sophia in the Fourteenth and Fifteenth Centuries: The Russian Travelers on the Relics*. *Dumbarton Oaks Papers*, 27, 69-87.

Mandelbrot B. B. (1982). *The fractal geometry of nature*. Freeman, New York.

Mango C. (1978). *Architettura bizantina* (No. 72.033). Electa.

Mannoni T. (2005). *Archeologia della produzione architettonica. Le tecniche costruttive*. *Arqueología de la Arquitectura*, (4), 11-19.

Marano Y. A. (2014). 'Roma non è stata (de) costruita in un giorno'. *Fonti giuridiche e reimpiego in età romana (I secolo AC-VI secolo DC)*. LANX. *Rivista della Scuola di Specializzazione in Archeologia-Università degli Studi di Milano*, (16), 1-54.

Mark D. M., Aronson P. B. (1984). *Scale-dependent fractal dimensions of topographic surfaces: an empirical investigation, with applications in geomorphology and computer mapping*. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 16(7), 671-683.

Mark R., Çakmak A. S., Hill K., Davison, R. (1993). *Structural analysis of Hagia Sophia: a historical perspective. Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings III*. Computational Mechanics Publications, UK.

Meyers J. (1999). *GIS in the utilities. Geographical Information Systems: Management Issues and Applications*, 2, 801-818.

Miles R. B., Lempert W. R., Forkey J. N. (2001). *Laser rayleigh scattering. Measurement Science and Technology*, 12(5), R33.

Miriello D. (2005). *Studio petrografico, mineralogico e geochimico dei materiali lapidei naturali e artificiali del castello svevo di Rocca Imperiale (CS): caratterizzazione e provenienza (Doctoral dissertation, Ph. D Thesis, University of Calabria, Department of Earth Sciences, Arcavacata di Rende (CS), Italy, unpublished)*.

Miriello D., Crisci G. M. (2007). Mixing and provenance of raw materials in the bricks from the Svevian castle of Rocca Imperiale (North Calabria, Italy). *European Journal of Mineralogy*, 19(1), 137-144.

Miriello D., Bloise A., De Luca R., Apollaro C., Crisci G. M., Medaglia S., Grasso A. T. (2015). First compositional evidences on the local production of Dressel 2–4 amphorae in Calabria (Southern Italy): characterization and mixing simulations. *Applied Physics A*, 119(4), 1595-1608.

Miriello D., Barba L., Blancas J., Bloise A., Cappa M., Cura M., Cura M., De Angelis D., De Luca R., Pecci A., Taranto M., Yavuz H. B. Crisci G. M. (2017). New compositional data on ancient mortars from Hagia Sophia (Istanbul, Turkey). *Archaeological and Anthropological Sciences*, 9(4), 499-514.

Morbidelli L. (2003). *Le Rocce e i loro costituenti fondamentali*. Bardi Ed., Roma.

Moropoulou A., Christaras B., Lavas G., Penelis G., Zias N., Biscontin G., Kollias E., Paisios A., Theoulakis P., Bisbikou K., Bakolas A. (1970). Weathering phenomena on the Hagia Sophia Basilica Konstantinople. *WIT Transactions on The Built Environment*, 4.

Moropoulou A., Cakmak A.S., Biscontin G. (1998). Criteria and Methodology to Evaluate the Hagia Sophia Crushed Brick/Lime Mortars, PACT, J. European Study Group on Physical, Chemical, Biological and Mathematical Techniques Applied to Archaeology 55, 39-54.

Moropoulou A., Bakolas A., Bisbikou K. (2000a). Investigation of the technology of historic mortars. *Journal of Cultural Heritage*, 1, 45-58.

Moropoulou A., Bakolas A., Moundoulas P., Anagnostopoulou S., Aggelakopoulou E. (2000b). Compatible Restoration Mortars for the Earthquake Protection of Hagia Sophia, PACT, J. European Study Group on Physical, Chemical, Biological and Mathematical Techniques Applied to Archaeology 59, 29-51.

Moropoulou A., Cakmak A.S., Biscontin G., Bakolas A., Zendri E. (2002a). Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed brick y lime mortars of Justinian's Hagia Sophia. Construction and Building Materials, 16, 543-552.

Moropoulou, A., Cakmak, A., & Polikreti, K. (2002b). Provenance and technology investigation of Agia Sophia bricks, Istanbul, Turkey. Journal of the American Ceramic Society, 85(2), 366-372.

Moropoulou A., Polikreti K., Bakolas A., Michailidis P. (2003). Correlation of physicochemical and mechanical properties of historical mortars and classification by multivariate statistics. Cement and Concrete Research, 33, 891-898.

Moropoulou A., Labropoulos K., Moundoulas P., Bakolas A. (2006). The contribution of historic mortars on the earthquake resistance of Byzantine monuments, in Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties ed. (Konsta-Gdoutos, M.S.), Springer, 643-652.

Moropoulou A., Polikreti K. (2010). Studying the Hagia Sofia structural materials: the conservation of the national technical university of athens to the monument's protection. Annual of Hagia Sofia Museum n°13, Istanbul, 2010.

Moropoulou A., Labropoulos K.C., Katsiotis N.S. (2012a). Assessing the Preservation State and Revealing Plastered Mosaics in Hagia Sophia Using Ground Penetrating Radar. Journal of Materials Science and Engineering A. 2, 183-189.

Moropoulou A., Labropoulos K.C., Katsiotis N.S. (2012b). Application of Ground Penetrating Radar for the Assessment of the Decay State of Hagia Sophia's Mosaics. *Emerging Technologies in Non-Destructive Testing V*, Paipetis et al. (eds), Taylor e Francis Group, London, 25-30.

Moropoulou A., Bakolas A., Karoglou M., Delegou E.T., Labropoulos K.C., Katsiotis N.S. (2013). Diagnostics and Protection of Hagia Sophia Mosaics. *Journal of Cultural Heritage*, 14, 133-139.

Muller H. J. (1952). *The uses of the past: Profiles of former societies (Vol. 9)*. New York: Oxford University Press.

Obe, R. O., Hsu L. S. (2015). *PostGIS in action*. Manning Publications Co. New York.

Peccerillo A., Perugini D. (2005). *Introduzione alla petrografia ottica*. Morlacchi Editore, Perugia.

Peterson S. E. (2009). *Thin-Section Petrography of Ceramic Materiales*. INSTAP Academic Press. Philadelphia.

Powers M. C. (1953). A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, 23(2), 117-119.

Procopio D. C. (1961). *De Aedificiis*. G. DINDORF (a cura di), *Corpus Scriptorum Historiae Bizantinae*, 3-11.

Ripley B. D. (2005). *Spatial statistics (Vol. 575)*. John Wiley & Sons. United Kingdom.

Rossi E. (1938). ATATÜRK (1880–1938). *Oriente Moderno*, 18(12), 635-646.

Roudometof V. (1964). Nationalism, globalization, and orthodoxy: the social origins of ethnic conflict in the Balkans (Vol. 89). Greenwood Publishing Group. Usa.

Shepherd W. R. (1911). Historical atlas. H. Holt. New York.

Schibille N. (2016). Hagia Sophia and the Byzantine aesthetic experience. Routledge. Oxford.

Schwarz B. (2010). LIDAR: Mapping the world in 3D. Nature Photonics, 4(7), 429.

Shapiro M., Kurdinovskii Y. (1933). X-ray study of the quality of chamotte brick. Stal, (9), 77.

Sinaga, A. S. R. (2018). Optical Systems and Digital Image Acquisition. Juripol, 1(1), 61-67.

Taranto M., Barba L., Blancas J., Bloise A., Cappa M., Chiaravalloti F., Crisci G. G., Cura M., De Angelis D., De Luca R., Lezzerini, M., Pecci A., Miriello D. (in press). The bricks of Hagia Sophia (Istanbul, Turkey): a new hypothesis to explain their compositional difference. Journal of Cultural Heritage. DOI: 10.1016/j.culher.2019.02.009

Todeschini R. (1998). Introduzione alla chemiometria. EdiSES, Napoli.

Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K. (1982). Microwave remote sensing: active and passive. Vol. 2, Radar remote sensing and surface scattering and emission theory. Reading, MA: Addison-Wesley. Boston.

Underwood P. A., Hawkins E. J. (1961). The Mosaics of Hagia Sophia at Istanbul: The Portrait of the Emperor Alexander: A Report on Work Done by the Byzantine Institute in 1959 and 1960. *Dumbarton Oaks Papers*, 187-217.

Van Nice R. L., *Dumbarton Oaks Research Library & Collection* (Washington). Center for Byzantine Studies. (1965). *Saint Sophia in Istanbul: an architectural survey*. Dumbarton Oaks Publ. Service. Washington.

Walsh R. (2018). *Constantinople and the Scenery of the Seven Churches of Asia Minor*. BoD–Books on Demand.

Wentworth C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The journal of geology*, 30(5), 377-392.

Whittemore T. (1938). The Mosaics of St. Sophia at Istanbul. *American Journal of Archaeology*, 42(2), 219-226.

Williamson W. O. (1954). The effects of rotational rolling on the fabric and drying shrinkage of clay. *American Journal of Science*, 252(3), 129-143.

Yücel E., Cimok F., Çalıköğlü M. E. (1984). *Hagia Sophia. A Turizm Yayınları*. Istanbul.

Zeiler M. (1999). *Modeling our world: the ESRI guide to geodatabase design*. ESRI, Inc..

RISORSE WEB

<https://cs.unc.edu/>]

http://etc.usf.edu/clipart/58200/58277/58277_hagia_plan.htm

<http://ayasofyamuzesi.gov.tr/en/int-interior>

<http://ayasofyamuzesi.gov.tr/en/int-wishing-column>

<https://www.pallasweb.com/p/hagiasophiadraw2.jpg>

RINGRAZIAMENTI

La vita è fatta di tappe e ognuna è il trampolino per tuffarsi nell'altra che verrà; sulla base di questa considerazione è stato possibile portare a termine il presente dottorato di ricerca.

I tre anni trascorsi sono stati un periodo intenso, che mi ha consentito di crescere sia dal punto di vista scientifico, che umano. Desidero pertanto esprimere la mia riconoscenza nei confronti di tutti coloro che mi hanno sostenuto ed aiutato durante questo periodo.

Grazie alla Direzione del Museo di Santa Sofia (Ayasofya Müzesi) e al Ministero della Cultura e del Turismo della Repubblica Turca, per il supporto, l'ospitalità e i permessi accordati per l'esecuzione delle ricerche.

Ringrazio il dott. Francesco Chiaravalloti del CNR-IRPI di Rende, per la sua disponibilità ed il suo aiuto su alcuni aspetti teorico-fisici affrontati in questo lavoro.

Ringrazio i colleghi del Dipartimento DiBEST che ho incontrato durante il mio percorso di dottorato per la loro collaborazione e disponibilità; in particolare la dott.ssa Raffaella De Luca, per la pazienza e la disponibilità con la quale mi ha sostenuto.

Ovviamente un ringraziamento particolare va ai miei relatori, dott. Domenico Miriello, dott.ssa Alessandra Pecci ed ing. Marco Cappa per i loro preziosi consigli e per la disponibilità.

Vorrei infine ringraziare la mia famiglia, vero sostegno a questa avventura appena conclusa; il loro amore ed il loro affetto sono stati la base su cui costruire ed ultimare questo lavoro: "mi siete stati vicino sia nei momenti felici, ed ancor di più nei momenti difficili. Grazie Serena, Franca e Giorgia".

APPENDICE A

DESCRIZIONE MACRO E MICROSCOPICA DEI CAMPIONI

CAMPIONE BAS1

Ubicazione zona di campionamento: Porzione muro bizantino angolo NE.

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): VI Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



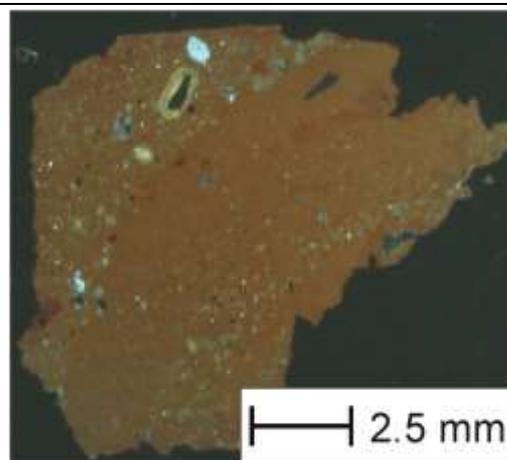
Foto macroscopica del campione BAS1

- Colore Munsell: 2.5YR6/8.
- Colore RGB medio: R (182) G (125) B (90).
- Dimensioni non-plastic inclusions: < 1 mm.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: < 1 mm.
- Note: addensamento non-plastic inclusions disomogeneo.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS1 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS1 a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 67 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 693 μm .
- "Size class" Wentworth (1922): Very Fine Sand.

- % non-plastic inclusions (dimensione >1/16 mm): 3.60.
- % matrice (dimensione <1/16 mm): 88.75.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 24.66.
- % macroporosità (dimensione >1/16 mm): 2.25.
- % calcite secondaria: 5.40.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, pirosseno, calcite, ematite, muscovite, biotite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, granitoidi.
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Moderately Well Sorted
- Isotropia della matrice: Bassa.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub-rounded.
- Sfericità (Powers 1953): Low sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS2

Ubicazione zona di campionamento: Muro perimetrale della scala di NW.

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): VI Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



Foto macroscopica del campione BAS1.

- Colore Munsell: 2.5YR5/6.
- Colore RGB medio: R (162) G (114) B (87).
- Dimensioni non-plastic inclusions: > 1 mm <2 mm.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: > 1 mm <3 mm.
- Note: addensamento non-plastic inclusions disomogeneo.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS2 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS2 a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 700 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions : 2400 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Coarse Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 7.29.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 78.84.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 10.76.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 6.08.
- % calcite secondaria: 8.16.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, pirosseno, biotite, muscovite, ematite, calcite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: filladi, quarziti, trachi-andesiti basaltiche (in tracce), trachi-andesiti (in tracce), daciti (in tracce).
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Very Well Sorted.
- Isotropia della matrice: Alta.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub-rounded.
- Sfericità (Powers 1953): Low sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS3

Ubicazione zona di campionamento: Arco di scarico nella muratura perimetrale della scala di NW.

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): X Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



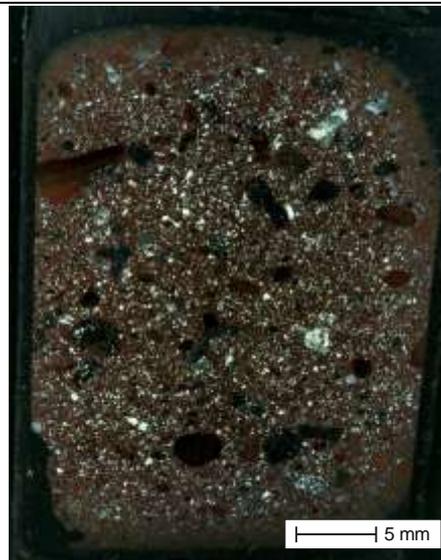
Foto macroscopica del campione BAS3.

- Colore Munsell: 10R4/8.
- Colore RGB medio: R (129) G (72) B (54).
- Dimensioni non-plastic inclusions: > 1 mm <5 mm.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: > 1 mm <3 mm.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS3 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS3 a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 580 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 5600 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Coarse Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 18.22.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 75.03.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 4.12.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 5.73.
- % calcite secondaria: 1.02.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, ortoclasio, muscovite, biotite, calcite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, granitoidi, daciti (in tracce).
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Moderately Well Sorted.
- Isotropia della matrice: Alta.
- Arrotondamento (Powers 1953): Rounded.
- Sfericità (Powers 1953): Low sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS4

Ubicazione zona di campionamento: Muro perimetrale lato W
 Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): VI Secolo.

Caratteristiche macroscopiche

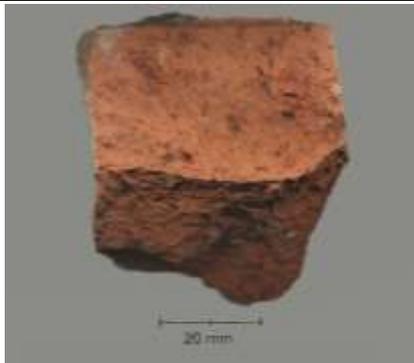


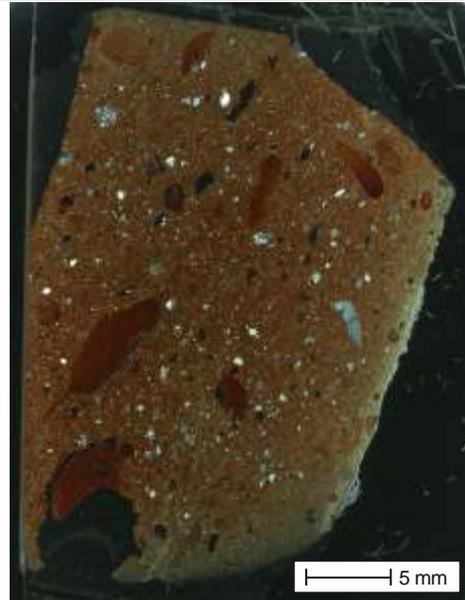
Foto macroscopica del campione BAS4.

- Colore Munsell: 2.5YR5/8.
- Colore RGB medio: R (161) G (100) B (70).
- Dimensioni non-plastic inclusions: > 1 mm <2 mm.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: > 1 mm <2.5 mm.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS4 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS4 a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 200 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 2697 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Medium Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 22.57.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 66.93.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 2.97.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 4.39.
- % calcite secondaria: 6.11.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, ortoclasio, pirosseni, calcite, ematite, muscovite, biotite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, granitoidi, filladi.
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Poorly Sorted.
- Isotropia della matrice: Bassa.
- Arrotondamento (Powers 1953): Angular.
- Sfericità (Powers 1953): High sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS5

Ubicazione zona di campionamento: Muro perimetrale lato W

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): VI Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



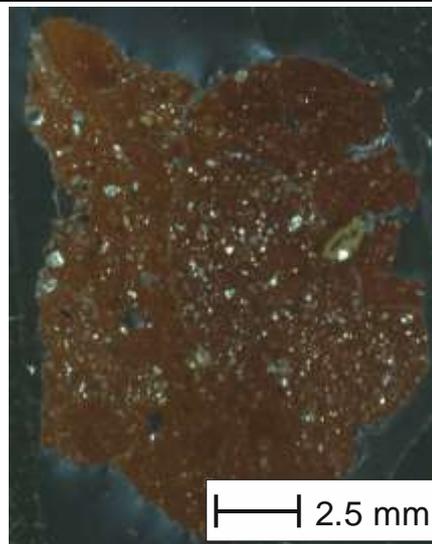
Foto macroscopica del campione BAS5.

- Colore Munsell: 10YR6/4.
- Colore RGB medio: R (169) G (148) B (111).
- Dimensioni non plastic elements: ~ 1 mm.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: < 0.5 mm.
- Note: colorazione disomogenea.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS5 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS5 a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 440 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 1220 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Medium Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 5.84.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 85.06.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 14.56.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 3.25.
- % calcite secondaria: 5.84.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, calcite, pirosseni, plagioclasio, ortoclasio, ematite, muscovite, biotite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, granitoidi, filladi.
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Moderately Well Sorted.
- Isotropia della matrice: Alta
- Arrotondamento (Powers 1953): Angular.
- Sfericità (Powers 1953): High sphericity.
- Chamotte: Assente.

CAMPIONE BAS6

Ubicazione zona di campionamento: Muro perimetrale N, sopra Nartece.

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): VI Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



Foto macroscopica del campione BAS6.

- Colore Munsell: 10YR5/6.
- Colore RGB medio: R (165) G (112) B (91).
- Dimensioni non-plastic inclusions: > 1 mm <2 mm.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: > 1 mm <10 mm.
- Note: colorazione disomogenea.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS6 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS6 a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 49 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 1619 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Coarse Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 3.06.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 86.08.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 28.17.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 4.24.
- % calcite secondaria: 6.62.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, pirosseno, plagioclasio, ortoclasio, biotite, ematite, muscovite, calcite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, filladi, arenarie.
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Well Sorted.
- Isotropia della matrice: Media.
- Arrotondamento (Powers 1953): Angular.
- Sfericità (Powers 1953): High sphericity.
- Chamotte: Assente.

CAMPIONE BAS7

Ubicazione zona di campionamento: Muro perimetrale W, strato interno.

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): VI Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



Foto macroscopica del campione BAS7.

- Colore Munsell: 10YR7/6.
- Colore RGB medio: R (193) G (168) B (115).
- Dimensioni non-plastic inclusions: > 1 mm < 6 mm.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: > 1 mm < 6 mm.
- Note: colorazione disomogenea.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS7 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS7 a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 184 μ m.

- Dimensione massima non-plastic inclusions: 6000 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Very Fine Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 12.92.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 75.42.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 5.84.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 4.63.
- % calcite secondaria: 7.02.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, calcite, ortoclasio, microclino, muscovite, biotite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, filladi, granitoidi.
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Poorly Sorted.
- Isotropia della matrice: Bassissima.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub angular.
- Sfericità (Powers 1953): High sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS8

Ubicazione zona di campionamento: Muro perimetrale contrafforte, scala NE.
 Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): VI Secolo.

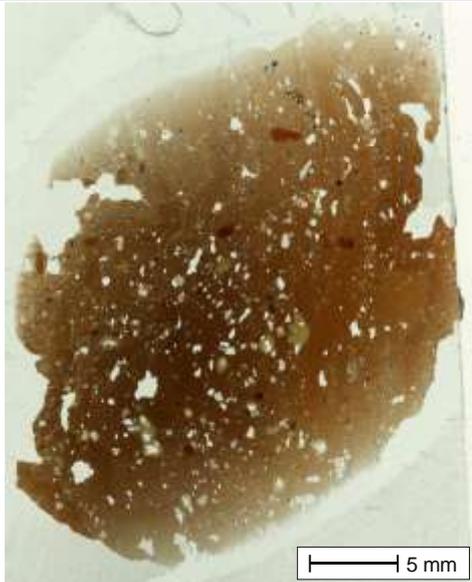
Caratteristiche macroscopiche



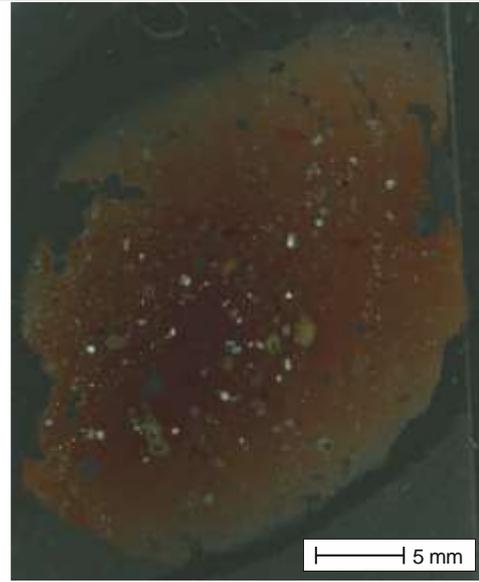
Foto macroscopica del campione BAS8.

- Colore Munsell: 2.5YR6/8.
- Colore RGB medio: R (183) G (123) B (86).
- Dimensioni non plastic elements: > 1 mm <2 mm.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: $< 1,5$ mm.
- Note: colorazione disomogenea.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS8 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS8 a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 238 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 1303 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Fine Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 7.32.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 84.36.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 11.52.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm mm): 4.66.
- % calcite secondaria: 3.66.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, ortoclasio, pirosseno, calcite, ematite, muscovite, biotite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, trachi-andesiti basaltiche (in tracce).
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Poorly Sorted.
- Isotropia della matrice: Media.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub angular.
- Sfericità (Powers 1953): High sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS9

Ubicazione zona di campionamento: Muro perimetrale contrafforte, scala NE, in corrispondenza dell'arco di scarico.

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): VI Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



Foto macroscopica del campione BAS9.

- Colore Munsell: 5YR6/6.
- Colore RGB medio: R (171) G (121) B (86).
- Dimensioni non- plastic inclusions: > 1 mm < 2 mm.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: > 1 mm < 3 mm.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS9 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS9 a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 214 μ m.

- Dimensione massima non-plastic inclusions: 2240 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Fine Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 11.17.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 71.99.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 6.45.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm mm): 7.39.
- % calcite secondaria: 9.45.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, pirosseno, ortoclasio, calcite, ematite, muscovite, biotite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, granitoidi, rioliti (in tracce).
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Moderately Well Sorted.
- Isotropia della matrice: Media.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub angular.
- Sfericità (Powers 1953): High sphericity.
- Chamotte: Assente.

CAMPIONE BAS10

Ubicazione zona di campionamento: Intradosso dell'arco esterno del tympana, lato N.
 Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): VI Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



Foto macroscopica del campione BAS10.

- Colore Munsell: 2.5YR6/6.
- Colore RGB medio: R (167) G (123) B (99).
- Dimensioni non-plastic inclusions: > 1 mm < 2 mm.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: > 1 mm < 2 mm.
- Note: colorazione disomogenea.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione
BAS10 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS10
a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 630 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 2370 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Coarse Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 8.56.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 83.66.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 9.77.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 4.28.
- % calcite secondaria: 3.50.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, pirosseno, ematite, muscovite, calcite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, filladi, latiti (in tracce), rioliti (in tracce).
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Moderately Sorted.
- Isotropia della matrice: Media.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub rounded.
- Sfericità (Powers 1953): Low sphericity.
- Chamotte: Assente.

CAMPIONE BAS11

Ubicazione zona di campionamento: Muro di riempimento lato N, sotto arco di scarico del contrafforte, Scala NW.

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): XIV Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



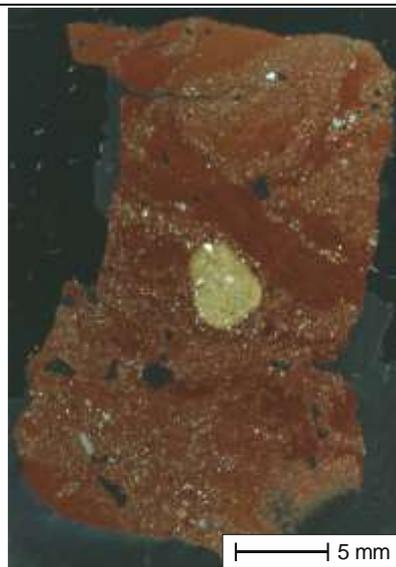
Foto macroscopica del campione BAS11.

- Colore Munsell: 10R5/8.
- Colore RGB medio: R (158) G (97) B (73).
- Dimensioni non-plastic inclusions: ~ 1 mm
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: > 1 mm < 2 mm.
- Note: colorazione disomogenea.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS11 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS11 a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 56 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 1259 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Coarse Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione >1/16 mm): 8.39.
- % matrice (dimensione <1/16 mm): 76.13.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 9.08.
- % macroporosità (dimensione >1/16 mm): 5.81.
- % calcite secondaria: 9.68.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, pirosseno, plagioclasio, ematite, ortoclasio, muscovite, calcite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, granitoidi, calcareniti.
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Well Sorted.
- Isotropia della matrice: Media.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub rounded.
- Sfericità (Powers 1953): Low sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS12

Ubicazione zona di campionamento: Arco di scarico nella muratura perimetrale a N.
 Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): VI Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



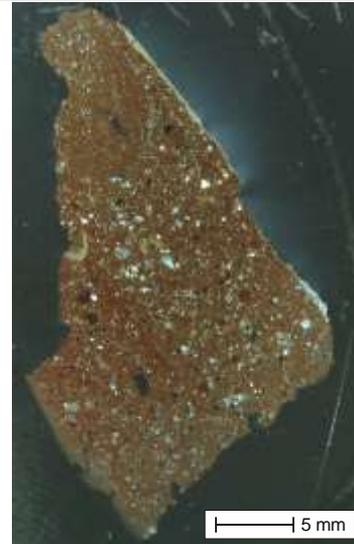
Foto macroscopica del campione BAS12.

- Colore Munsell: 2.5YR5/6.
- Colore RGB medio: R (150) G (98) B (71).
- Dimensioni non-plastic inclusions: ~ 1 mm
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: > 1 mm < 2 mm.
- Note: tracce di bioclasti.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS12
a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS12
a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 355 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 1042 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Medium Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 16.79.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 69.47.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 4.14.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 3.56.
- % calcite secondaria: 10.18.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, calcite, pirosseno, ematite, muscovite, biotite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, filladi, granitoidi, latiti (in tracce).
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Moderately Well Sorted.
- Isotropia della matrice: Media.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub angular.
- Sfericità (Powers 1953): High sphericity.
- Chamotte: Presente.
- Altro: Bioclasti (tracce).

CAMPIONE BAS13

Ubicazione zona di campionamento: Muro esterno del Tympana, lato N.

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): VI Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



Foto macroscopica del campione BAS13.

- Colore Munsell: 2.5YR6/6.
- Colore RGB medio: R (167) G (119) B (92).
- Dimensioni non-plastic inclusions: $> 1 \text{ mm} < 4 \text{ mm}$.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: $> 1 \text{ mm} < 3 \text{ mm}$.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS13 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS13 a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 274 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 4336 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Medium Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 14.51.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 73.28.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 5.05.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 4.23.
- % calcite secondaria: 7.98.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, pirosseno, ortoclasio, calcite, ematite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, granitoidi, trachi-andesiti (in tracce).
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Moderately Well Sorted.
- Isotropia della matrice: Media.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub angular.
- Sfericità (Powers 1953): High sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS14

Ubicazione zona di campionamento: Intradosso dell'arco esterno del tympana, lato N.
 Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): VI Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



Foto macroscopica del campione BAS14.

- Colore Munsell: 5YR6/6.
- Colore RGB medio: R (181) G (131) B (96).
- Dimensioni non-plastic inclusions: ~ 1 mm.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: > 1 mm < 4 mm.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS14
a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS14
a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 328 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 1141 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Medium Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 8.64.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 79.47.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 9.20.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 7.26.
- % calcite secondaria: 4.63.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, calcite, pirosseno, ortoclasio, ematite, muscovite, biotite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, granitoidi, trachi-basalti (in tracce).
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Poorly Sorted.
- Isotropia della matrice: Bassa.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub angular.
- Sfericità (Powers 1953): Low sphericity.
- Chamotte: Assente.

CAMPIONE BAS15

Ubicazione zona di campionamento: Muro perimetrale lato E.

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): VI Secolo.

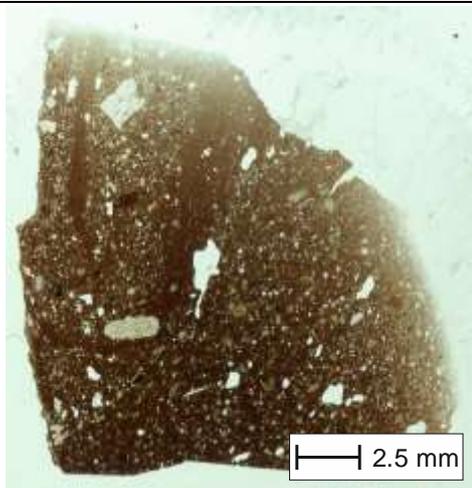
Caratteristiche macroscopiche



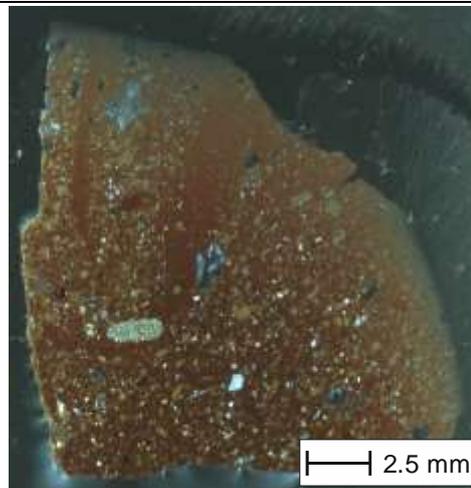
Foto macroscopica del campione BAS15.

- Colore Munsell: 2.5YR5/6.
- Colore RGB medio: R (154) G (105) B (82).
- Dimensioni non-plastic inclusions: $> 1 \text{ mm} < 2 \text{ mm}$.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: $> 1 \text{ mm} < 2 \text{ mm}$.
- Note: colorazione disomogenea.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS15 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS15 a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 223 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 2222 μm .
- "Size class" Wentworth (1922): Fine Sand.

- % non-plastic inclusions (dimensione >1/16 mm): 11.07.
- % matrice (dimensione <1/16 mm): 75.49.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 6.82.
- % macroporosità (dimensione >1/16 mm): 5.14.
- % calcite secondaria: 8.30.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, calcite, ematite, ortoclasio, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, rioliti (in tracce).
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Well Sorted.
- Isotropia della matrice: Media.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub rounded.
- Sfericità (Powers 1953): High sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS16

Ubicazione zona di campionamento: Muro perimetrale lato N, piano terra.

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): VI Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



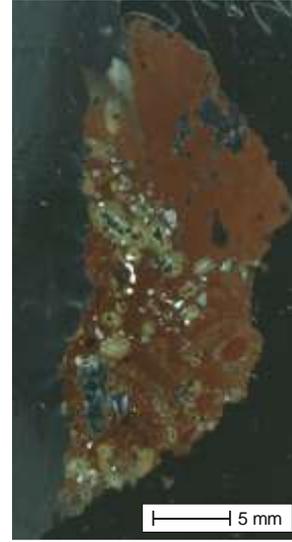
Foto macroscopica del campione BAS16.

- Colore Munsell: 10R4/6.
- Colore RGB medio: R (127) G (83) B (68).
- Dimensioni non-plastic inclusions: ~ 1 mm
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: > 1 mm < 5 mm.
- Note: colorazione disomogenea.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS16
a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS16
a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 362 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 1296 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Medium Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 8.10.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 76.32.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 9.42.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 9.35.
- % calcite secondaria: 6.23.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, calcite, plagioclasio, pirosseno, ortoclasio, ematite, biotite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, granitoidi, rioliti (in tracce), trachi-andesiti basaltiche (in tracce), trachiti (in tracce).
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Moderately Sorted.
- Isotropia della matrice: Bassa.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub angular.
- Sfericità (Powers 1953): High sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS17

Ubicazione zona di campionamento: Muratura esterna lato W, fronte esonartece.
Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): IV Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



Foto macroscopica del campione BAS17.

- Colore Munsell: 10R5/8.
- Colore RGB medio: R (158) G (98) B (73).
- Dimensioni non-plastic inclusions: ~ 1 mm
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: > 1 mm < 2 mm.
- Note: colorazione ed addensamento disomogenei.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione
BAS17 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile relativa al campione
BAS17 a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 200 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 1362 μm .

- “Size class” Wentworth (1922): Fine Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione >1/16 mm): 12.29.
- % matrice (dimensione <1/16 mm): 82.01.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 6.67.
- % macroporosità (dimensione >1/16 mm): 4.20.
- % calcite secondaria: 1.50.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, calcite, pirosseno, ematite, muscovite, biotite, ortoclasio, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, granitoidi, filladi.
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Well Sorted.
- Isotropia della matrice: Alta.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub rounded.
- Sfericità (Powers 1953): High sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS18

Ubicazione zona di campionamento: Muratura esterna lato W, fronte esonartece.

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): IV Secolo.

Caratteristiche macroscopiche

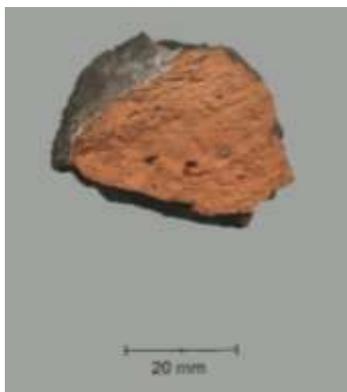


Foto macroscopica del campione BAS18.

- Colore Munsell: 2.5YR5/8.
- Colore RGB medio: R (171) G (108) B (72).
- Dimensioni non-plastic inclusions: ~ 1 mm.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: ~ 1 mm.
- Note: colorazione disomogenea.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione
BAS18 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS18
a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 210 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 879 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Fine Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 7.21.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 85.89.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 11.91.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 5.96.
- % calcite secondaria: 0.94.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, calcite, plagioclasio, muscovite, biotite, ematite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, filladi, granitoidi, andesiti (in tracce), benmoreiti (in tracce).
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Well Sorted.
- Isotropia della matrice: Bassa.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub angular.
- Sfericità (Powers 1953): High sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS19

Ubicazione zona di campionamento: Murature al piano interrato.

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): V Secolo.

Caratteristiche macroscopiche

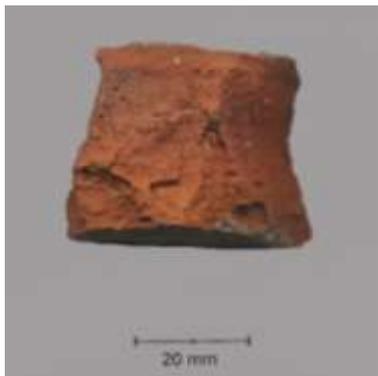


Foto macroscopica del campione BAS19.

- Colore Munsell: 10R5/8.
- Colore RGB medio: R (152) G (87) B (61).
- Dimensioni non-plastic inclusions: ~ 1 mm.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: ~ 1 mm.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS19 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS19 a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 270 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 1277 μm .

- “Size class” Wentworth (1922): Medium Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione >1/16 mm): 27.35.
- % matrice (dimensione <1/16 mm): 62.82.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 2.30.
- % macroporosità (dimensione >1/16 mm): 7.48.
- % calcite secondaria: 2.35.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, calcite, ematite, pirosseno, muscovite, biotite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: granitoidi, quarziti, filladi.
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Poorly Sorted.
- Isotropia della matrice: Alta.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub rounded.
- Sfericità (Powers 1953): Low sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS20

Ubicazione zona di campionamento: Murature al piano interrato.
 Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): V Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



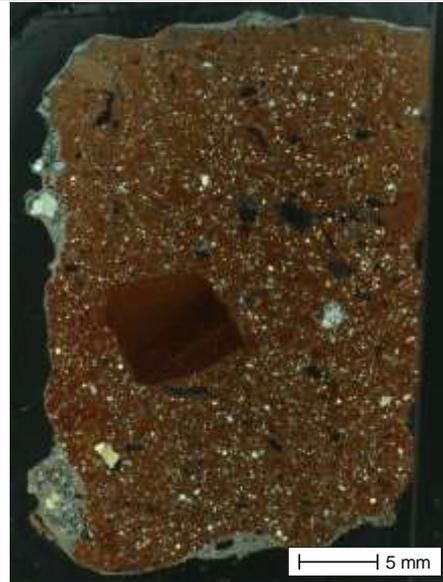
Foto macroscopica del campione BAS20.

- Colore Munsell: 2.5YR3/6.
- Colore RGB medio: R (114) G (64) B (46).
- Dimensioni non-plastic inclusions: > 1 mm < 2 mm.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: > 1 mm < 2 mm.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS20 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS20 a nicol incrociati

- Dimensione media non-plastic inclusions: 260 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 1864 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Medium Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 14.72.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 77.59.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 5.27.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 6.76.
- % calcite secondaria: 0.93.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, ortoclasio, muscovite, pirosseno, calcite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: granitoidi, quarziti, filladi.
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Very Well Sorted.
- Isotropia della matrice: Media.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub angular.
- Sfericità (Powers 1953): High sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS21

Ubicazione zona di campionamento: Murature al piano interrato.

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): V Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



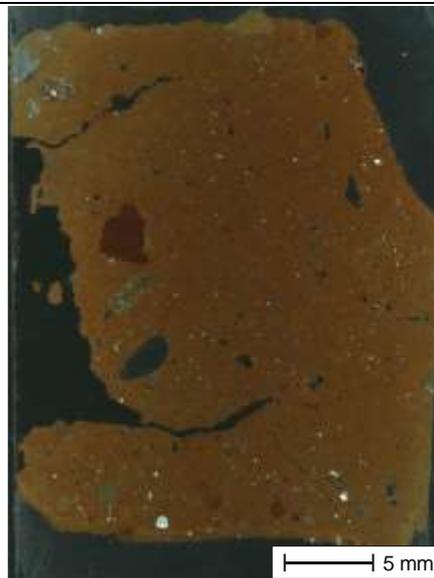
Foto macroscopica del campione BAS21.

- Colore Munsell: 2.5YR4/8.
- Colore RGB medio: R (141) G (91) B (59).
- Dimensioni non-plastic inclusions: ~ 1 mm
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: > 1 mm < 2 mm.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS21 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS21 a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 123 μm .

- Dimensione massima non-plastic inclusions: 2271 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Very Fine Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 5.09.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 89.06.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 5.27.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 17.48.
- % calcite secondaria: 0.94.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, ortoclasio, pirosseno, ematite, biotite, muscovite, calcite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, filladi, trachi-andesiti (in tracce), daciti (in tracce).
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Moderately Well Sorted.
- Isotropia della matrice: Media.
- Arrotondamento (Powers 1953): Angular.
- Sfericità (Powers 1953): High sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS22

Ubicazione zona di campionamento: Murature al piano interrato.

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): IV Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



Foto macroscopica del campione BAS22.

- Colore Munsell: 10R5/10.
- Colore RGB medio: R (172) G (98) B (60).
- Dimensioni non-plastic inclusions: ~ 1 mm
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: > 1 mm < 2 mm.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione
BAS22 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS22
a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 387 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 1715 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Medium Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 6.34.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 87.97.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 13.87.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 3.90.
- % calcite secondaria: 1.79.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, ortoclasio, plagioclasio, pirosseno, ematite, muscovite, minerali opachi, calcite.
- Tipologia di rocce: quarziti, granitoidi, trachi-basalti (in tracce), latiti (in tracce).
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Poorly Sorted.
- Isotropia della matrice: Media.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub angular.
- Sfericità (Powers 1953): Low sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS23

Ubicazione zona di campionamento: Intradosso dell'arco esterno del tympana, lato S.

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): VI Secolo.

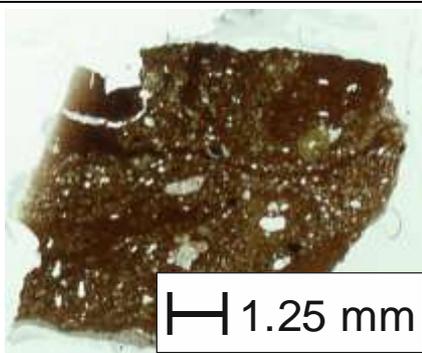
Caratteristiche macroscopiche



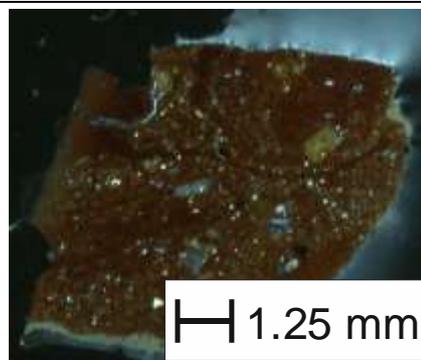
Foto macroscopica del campione BAS23.

- Colore Munsell: 2.5YR6/6.
- Colore RGB medio: R (169) G (127) B (98).
- Dimensioni non-plastic inclusions: ~ 1 mm
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: ~ 0.5 mm

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione
BAS23 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS23
a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 123 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 901 μm .
- "Size class" Wentworth (1922): Very Fine Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 10.20.

- % matrice (dimensione <1/16 mm): 81.63.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 8.00.
- % macroporosità (dimensione >1/16 mm mm): 0.00.
- % calcite secondaria: 8.16.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, pirosseno, ortoclasio, ematite, calcite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: filladi, quarziti.
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Moderately Well Sorted.
- Isotropia della matrice: Media.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub rounded.
- Sfericità (Powers 1953): Low sphericity.
- Chamotte: Assente.

CAMPIONE BAS24

Ubicazione zona di campionamento: Muratura esterna lato S, in corrispondenza imposta apertura.

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): XIV Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



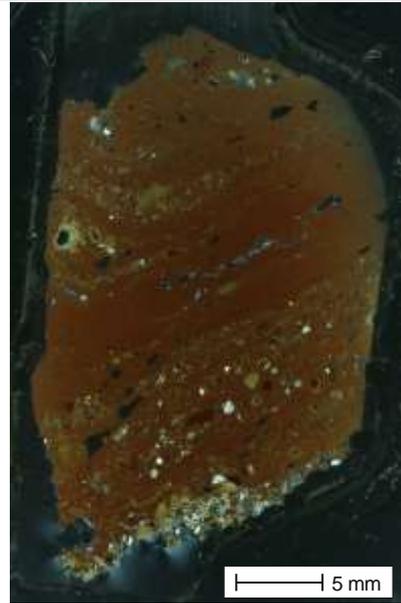
Foto macroscopica del campione BAS24.

- Colore Munsell: 10R7/6.
- Colore RGB medio: R (188) G (148) B (124).
- Dimensioni non-plastic inclusions: ~ 1 mm
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: > 1 mm < 4 mm.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione
BAS24 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS24
a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 464 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 1141 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Medium Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 6.46.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 86.69.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 13.42.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 4.11.
- % calcite secondaria: 2.74.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, pirosseno, ortoclasio, calcite, ematite, muscovite, biotite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: filladi, trachi-andesiti (in tracce), trachiti (in tracce).
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Well Sorted.
- Isotropia della matrice: Bassa.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub rounded.
- Sfericità (Powers 1953): High sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS25

Ubicazione zona di campionamento: Muratura interna lato S.

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): VI Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



Foto macroscopica del campione BAS25.

- Colore Munsell: 2.5YR5/6.
- Colore RGB medio: R (159) G (118) B (94).
- Dimensioni non-plastic inclusions: $> 1 \text{ mm} < 2 \text{ mm}$.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: $> 1 \text{ mm} < 1.5 \text{ mm}$.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS25 a nicol paralleli



Scansione della sezione sottile del campione BAS25 a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 86 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 1955 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Very Fine Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 15.81.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 74.42.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 4.71.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 6.28.
- % calcite secondaria: 3.49.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, calcite, plagioclasio, ortoclasio, pirosseno, ematite, muscovite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, arenarie.
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Well Sorted.
- Isotropia della matrice: Bassa.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub rounded.
- Sfericità (Powers 1953): Low sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS26

Ubicazione zona di campionamento: Muratura interna lato SE.
 Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): XIV Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



Foto macroscopica del campione BAS26.

- Colore Munsell: 2.5YR5/6.
- Colore RGB medio: R (159) G (118) B (94).
- Dimensioni non-plastic inclusions: > 1 mm $<$ 2 mm.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: > 1 mm $<$ 2.5 mm.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione
BAS26 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS26
a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 290 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 2225 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Medium Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 15.27.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 74.25.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 4.86.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 8.68.
- % calcite secondaria: 1.80.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, ortoclasio, pirosseno, ematite, calcite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, granitoidi, filladi, arenaria, trachite (in tracce), dacite (in tracce).
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Moderately Well Sorted.
- Isotropia della matrice: Alta.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub rounded.
- Sfericità (Powers 1953): Low sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS27

Ubicazione zona di campionamento: Muratura interna lato SE.

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): XIV Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



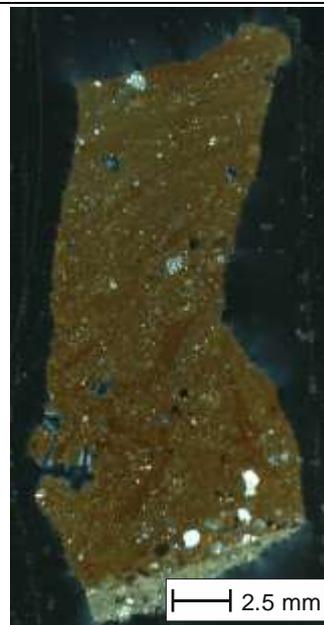
Foto macroscopica del campione BAS27.

- Colore Munsell: 5YR7/6.
- Colore RGB medio: R (190) G (152) B (118).
- Dimensioni non-plastic inclusions: < 1 mm.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: < 1 mm.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS27 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS27 a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 260 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 694 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Medium Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 6.10.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 91.08.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 14.92.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 1.88.
- % calcite secondaria: 0.94.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, pirosseno, plagioclasio, ortoclasio, calcite, ematite, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti.
- “Sorting” non plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): MWS.
- Isotropia della matrice: Bassa.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub rounded.
- Sfericità (Powers 1953): High sphericity.
- Chamotte: Presente.

CAMPIONE BAS28

Ubicazione zona di campionamento: Muratura interna, balconata del nartece a W.
 Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): X Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



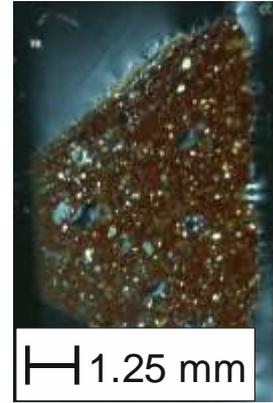
Foto macroscopica del campione BAS28.

- Colore Munsell: 2.5YR7/4.
- Colore RGB medio: R (186) G (151) B (133).
- Dimensioni non-plastic inclusions: < 1 mm.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: < 1 mm.

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione
BAS28 a nicol paralleli.



Scansione della sezione sottile del campione BAS28
a nicol incrociati.

- Dimensione media non-plastic inclusions: 92 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 557 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Very Fine Sand.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 10.87.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 78.26.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 7.20.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 8.70.
- % calcite secondaria: 2.17.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, hematite, clorite, gesso, minerali opachi, calcite.
- Tipologia di rocce: quarziti, granitoidi.
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Poorly Sorted.
- Isotropia della matrice: Alta.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub rounded.
- Sfericità (Powers 1953): High sphericity.
- Chamotte: Assente.

CAMPIONE BAS29

Ubicazione zona di campionamento: Muratura interna, balconata del narcece a W.

Probabile datazione da studi storici (Mainstone, 2009): X Secolo.

Caratteristiche macroscopiche



Foto macroscopica del campione BAS29.

- Colore Munsell: 2.5YR6/6.
- Colore RGB medio: R (184) G (130) B (102).
- Dimensioni non-plastic inclusions: < 1 mm.
- Vacuoli: osservabili ad occhio nudo.
- Range dimensionale vacuoli: > 1 mm < 3 mm

Caratteristiche microscopiche



Scansione della sezione sottile del campione BAS29 a nicol paralleli.

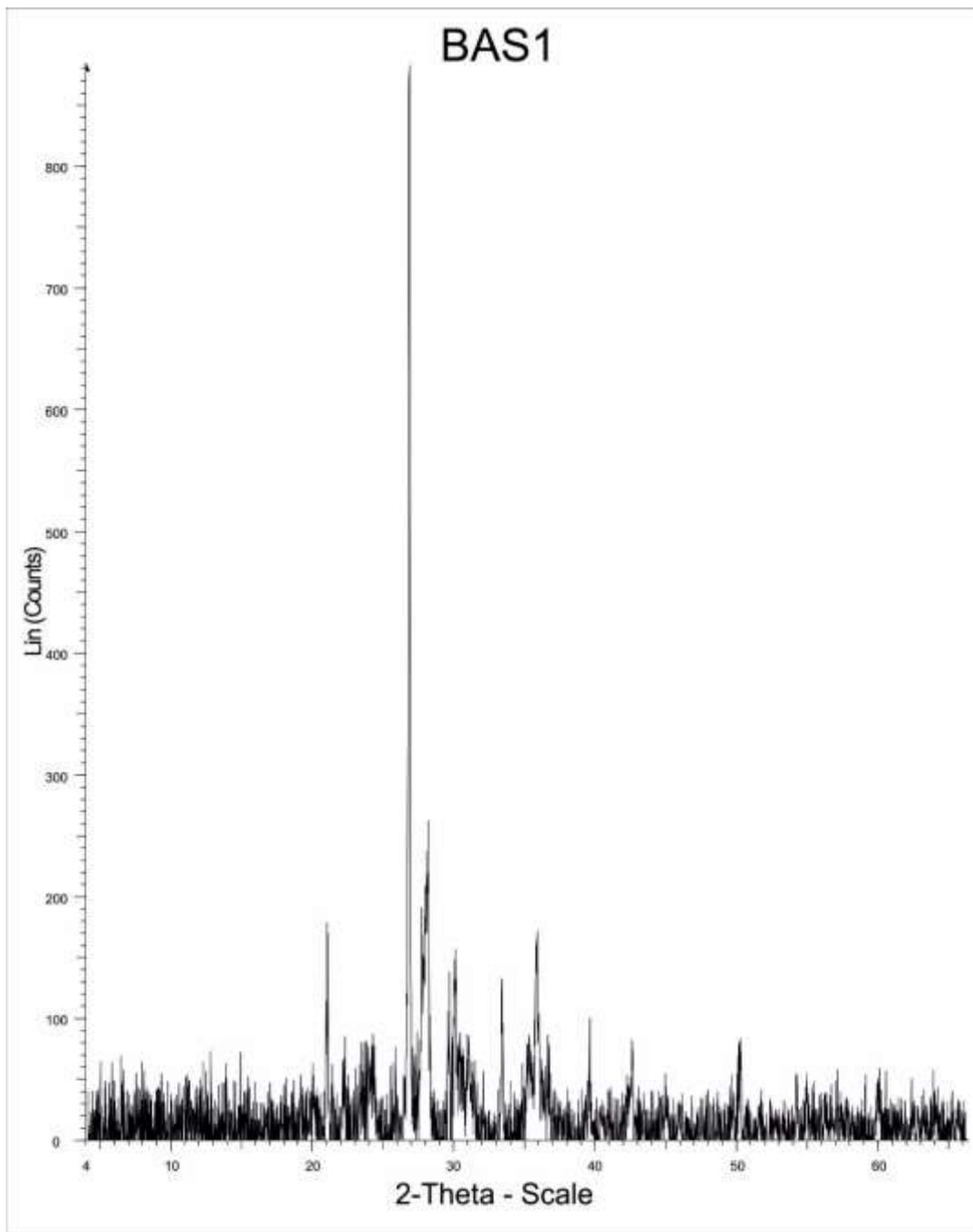


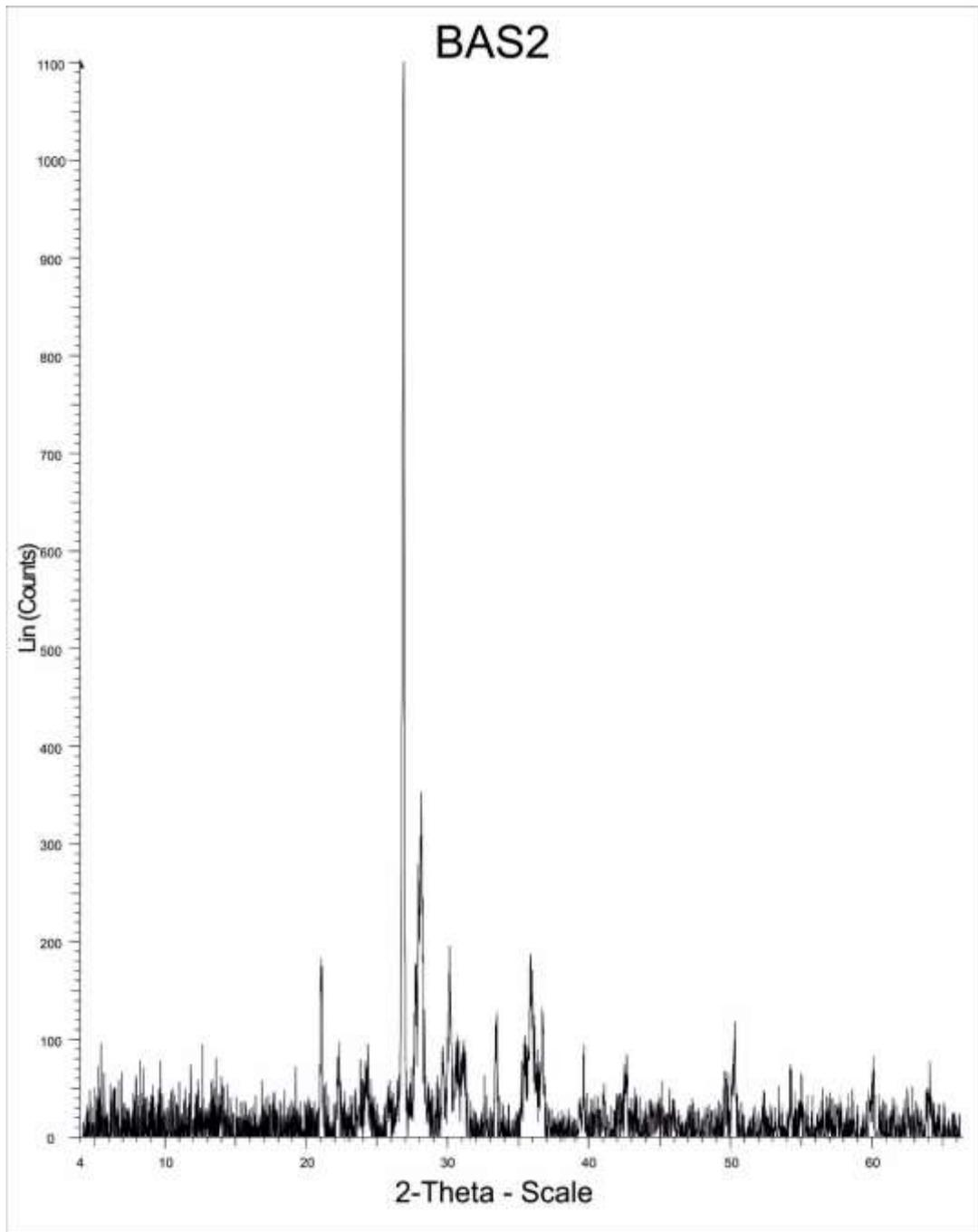
Scansione della sezione sottile del campione BAS29 a nicol incrociati.

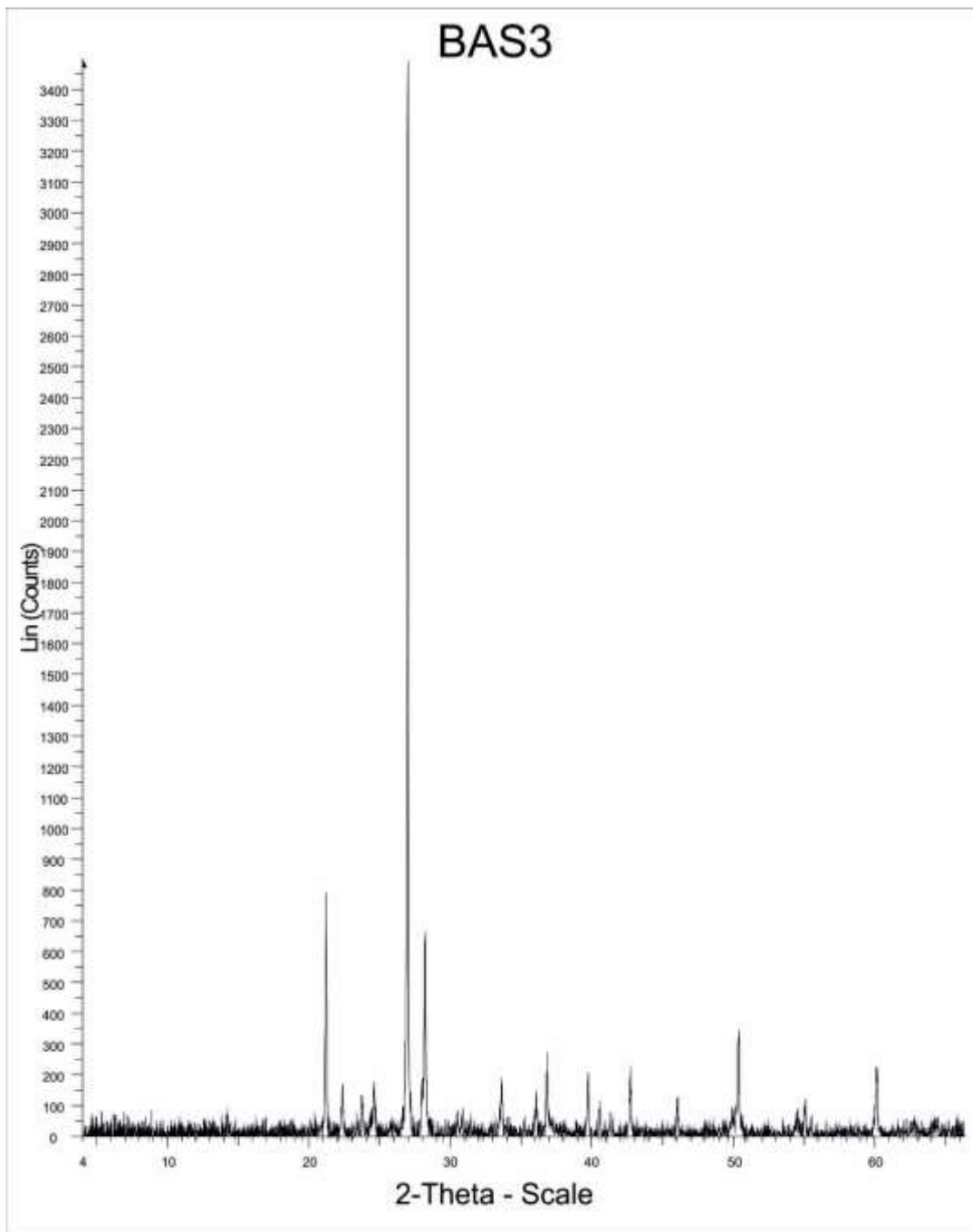
- Dimensione media non-plastic inclusions: 60 μm .
- Dimensione massima non-plastic inclusions: 423 μm .
- “Size class” Wentworth (1922): Coarse Silt.
- % non-plastic inclusions (dimensione $>1/16$ mm): 9.09.
- % matrice (dimensione $<1/16$ mm): 75.76.
- Rapporto matrice/non-plastic inclusions: 8.33.
- % macroporosità (dimensione $>1/16$ mm): 13.64.
- % calcite secondaria: 1.52.
- Fasi mineralogiche non-plastic inclusions in ordine di abbondanza: quarzo, plagioclasio, calcite, ortoclasio, ematite, muscovite, pirosseno, minerali opachi.
- Tipologia di rocce: quarziti, granitoidi.
- “Sorting” non-plastic inclusions (Boggs 2010; Jerram 2001): Well Sorted.
- Isotropia della matrice: Bassa.
- Arrotondamento (Powers 1953): Sub rounded.
- Sfericità (Powers 1953): High sphericity.
- Chamotte: Assente.

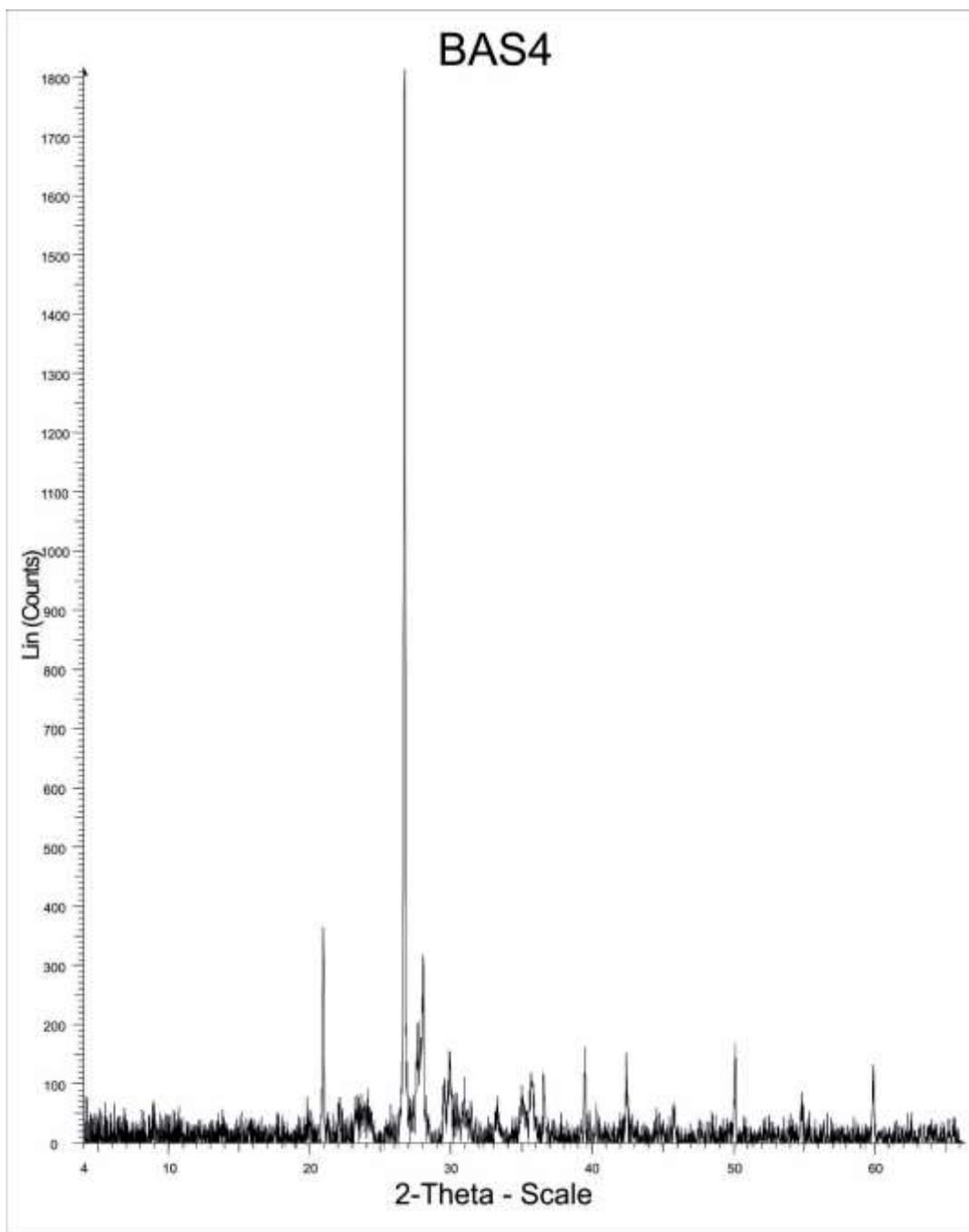
APPENDICE B

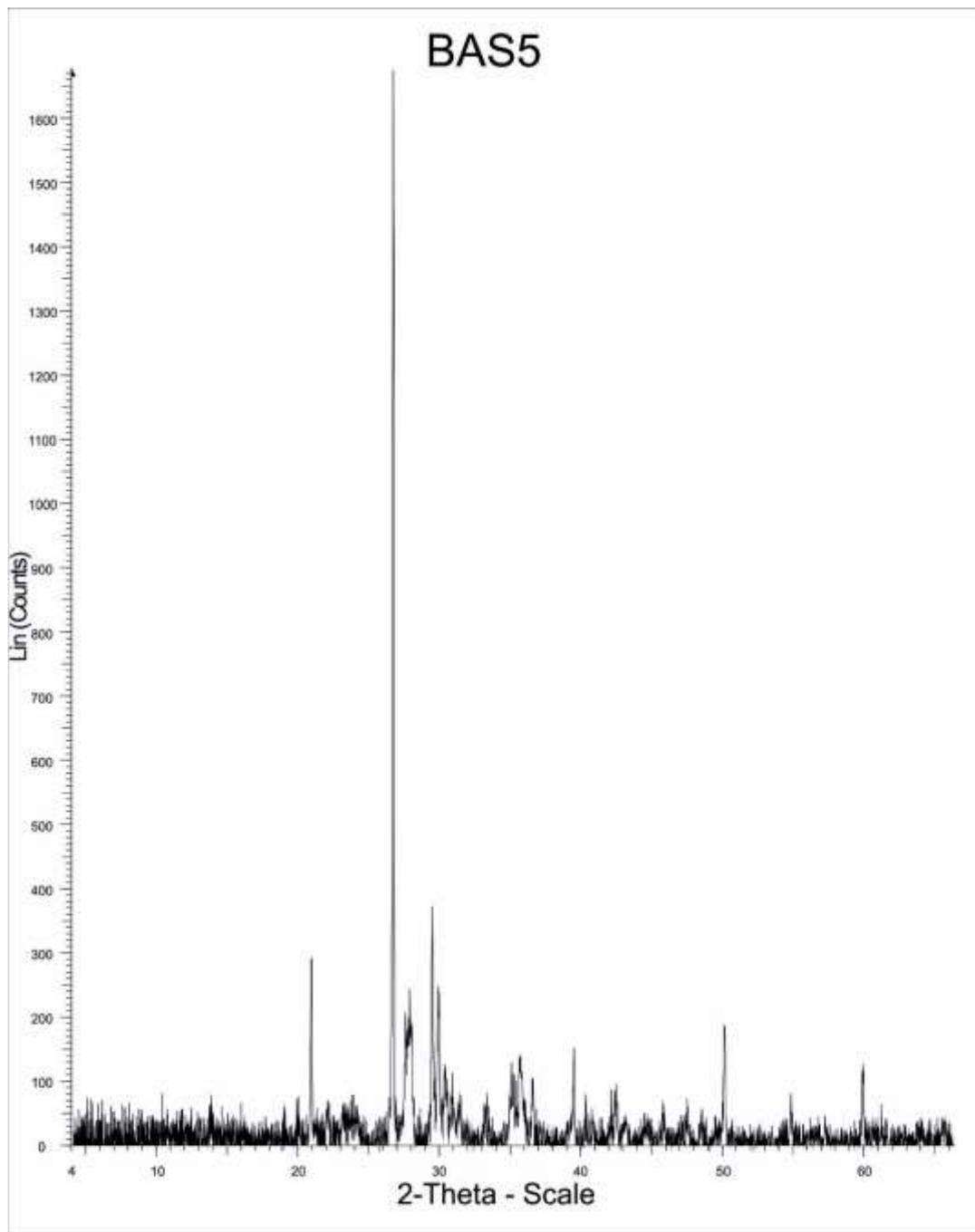
DIFFRATTOGRAMMI

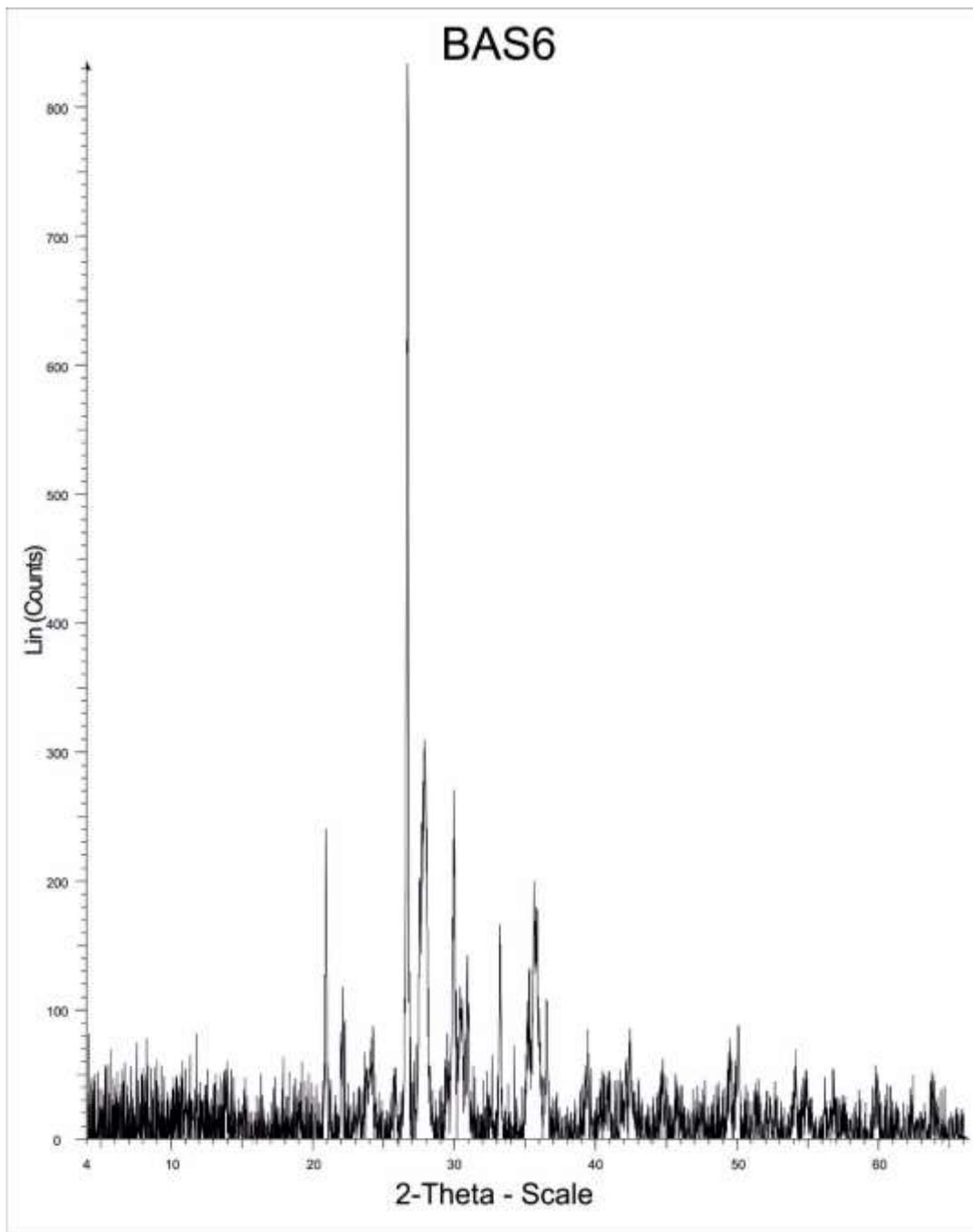


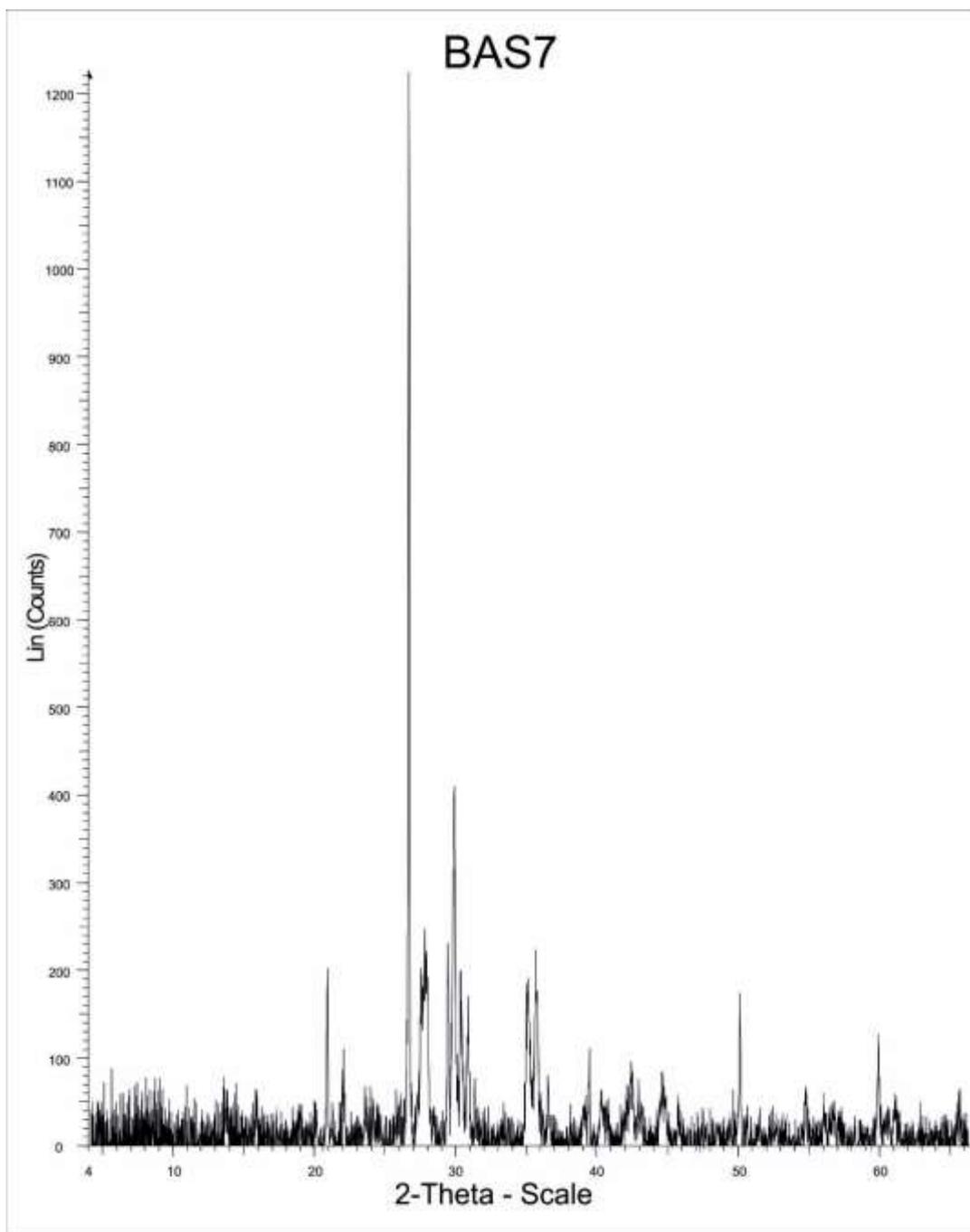


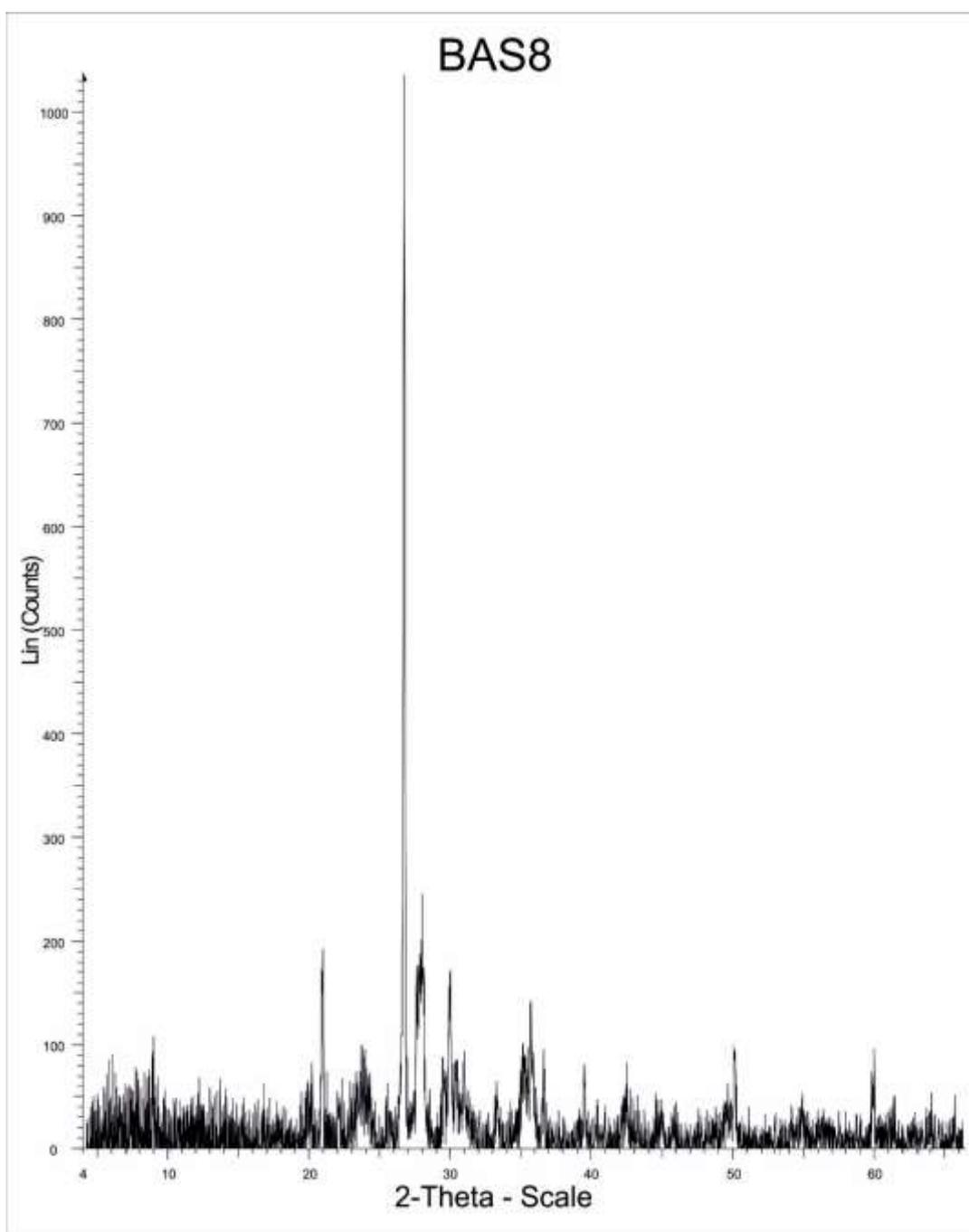


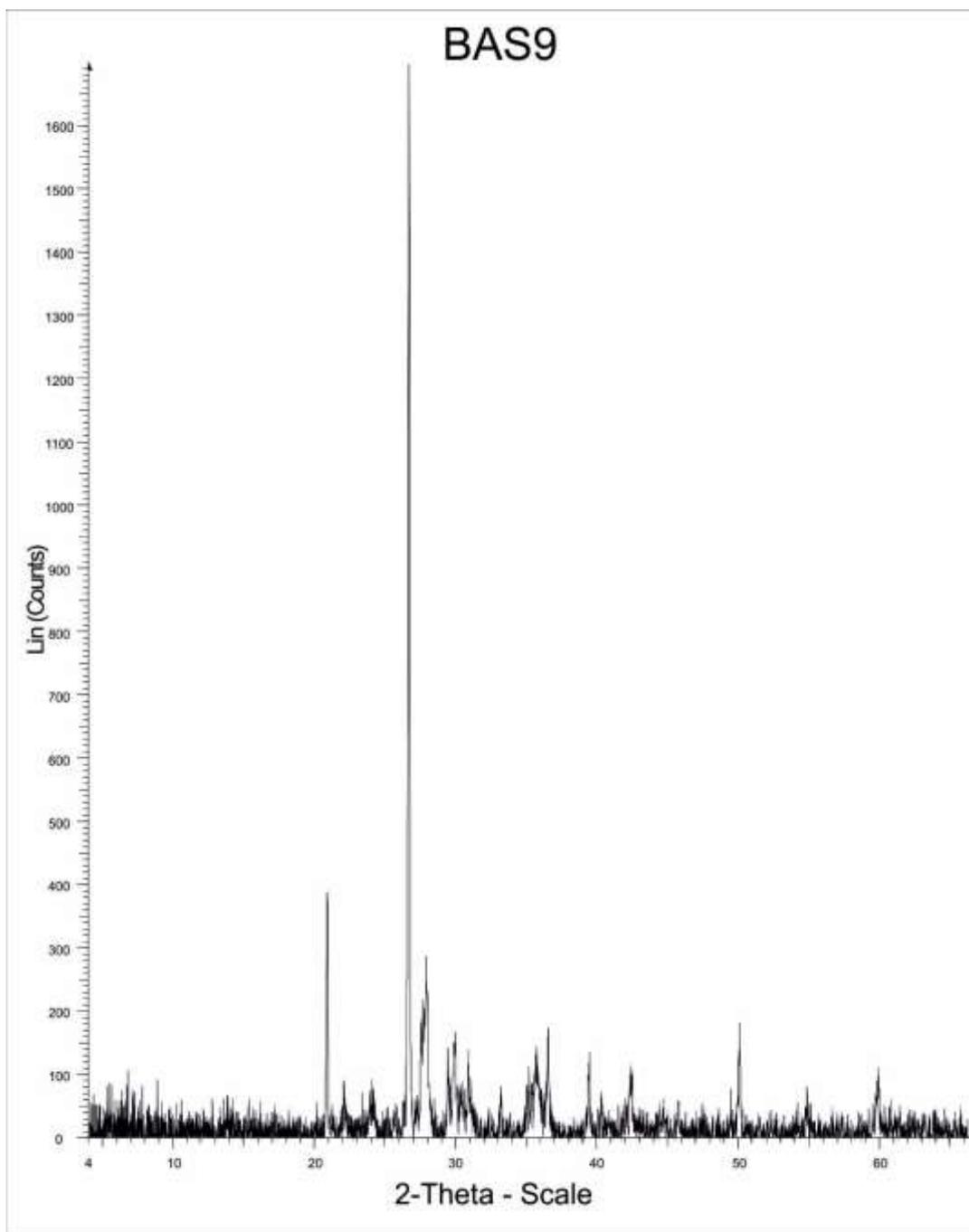


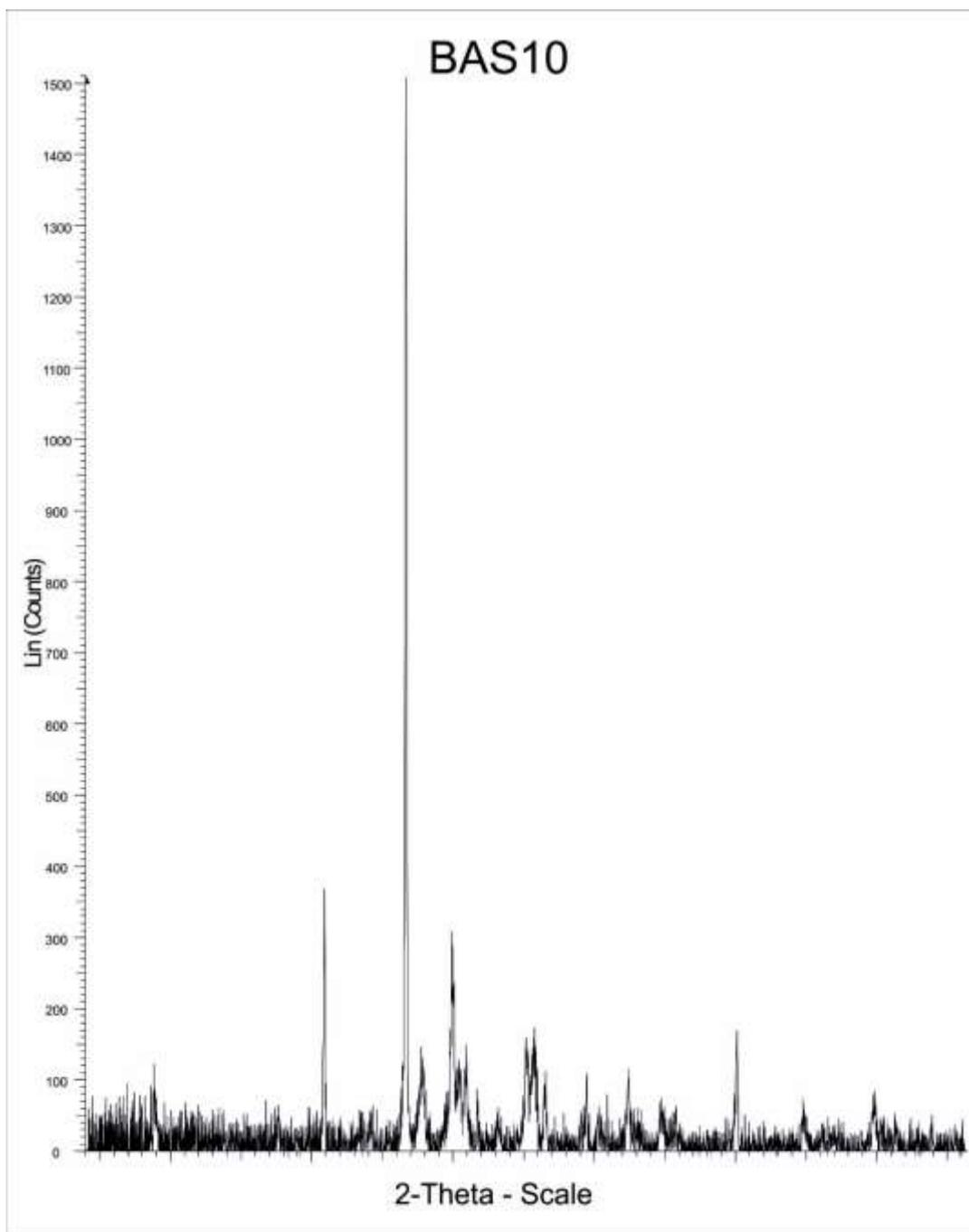


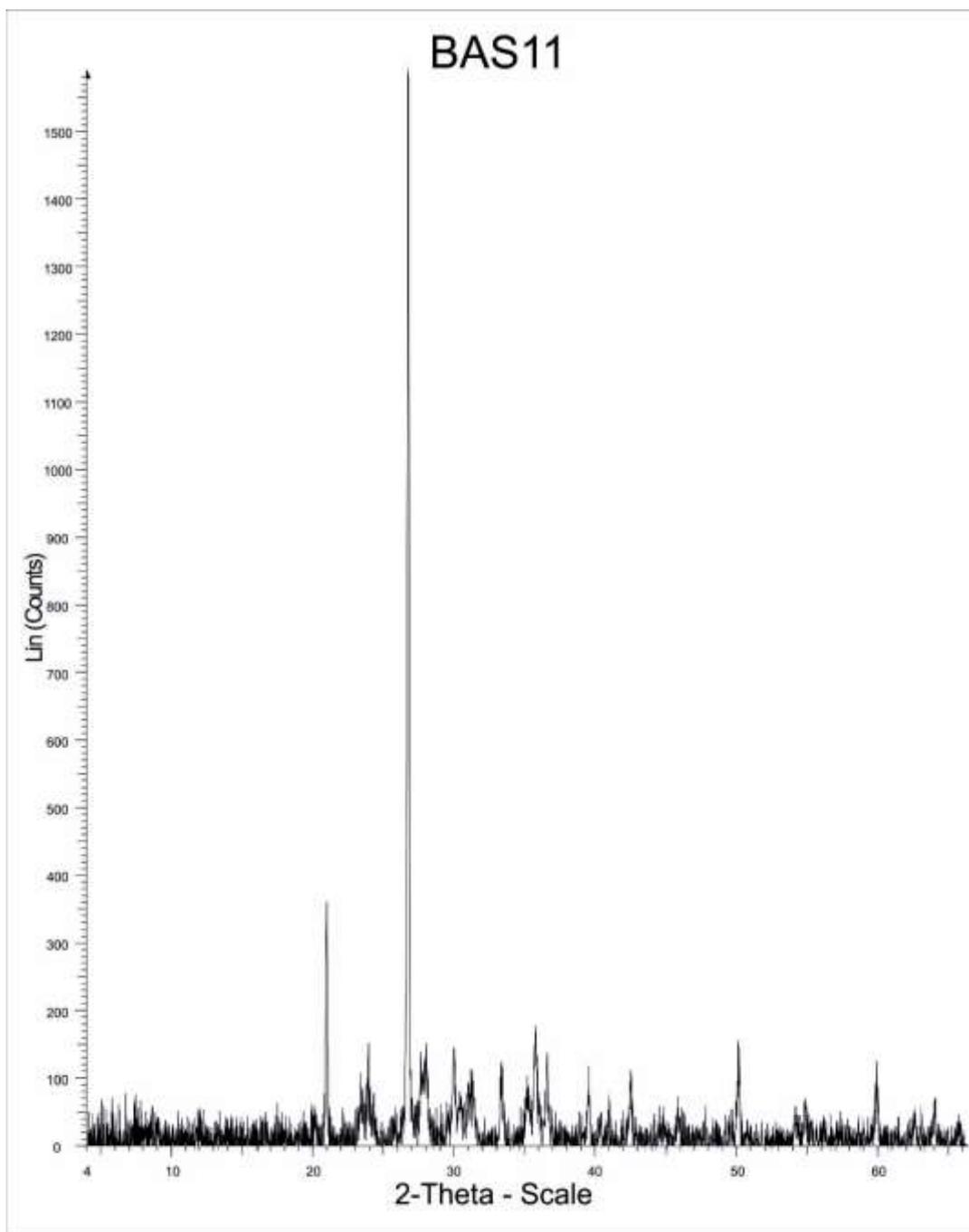


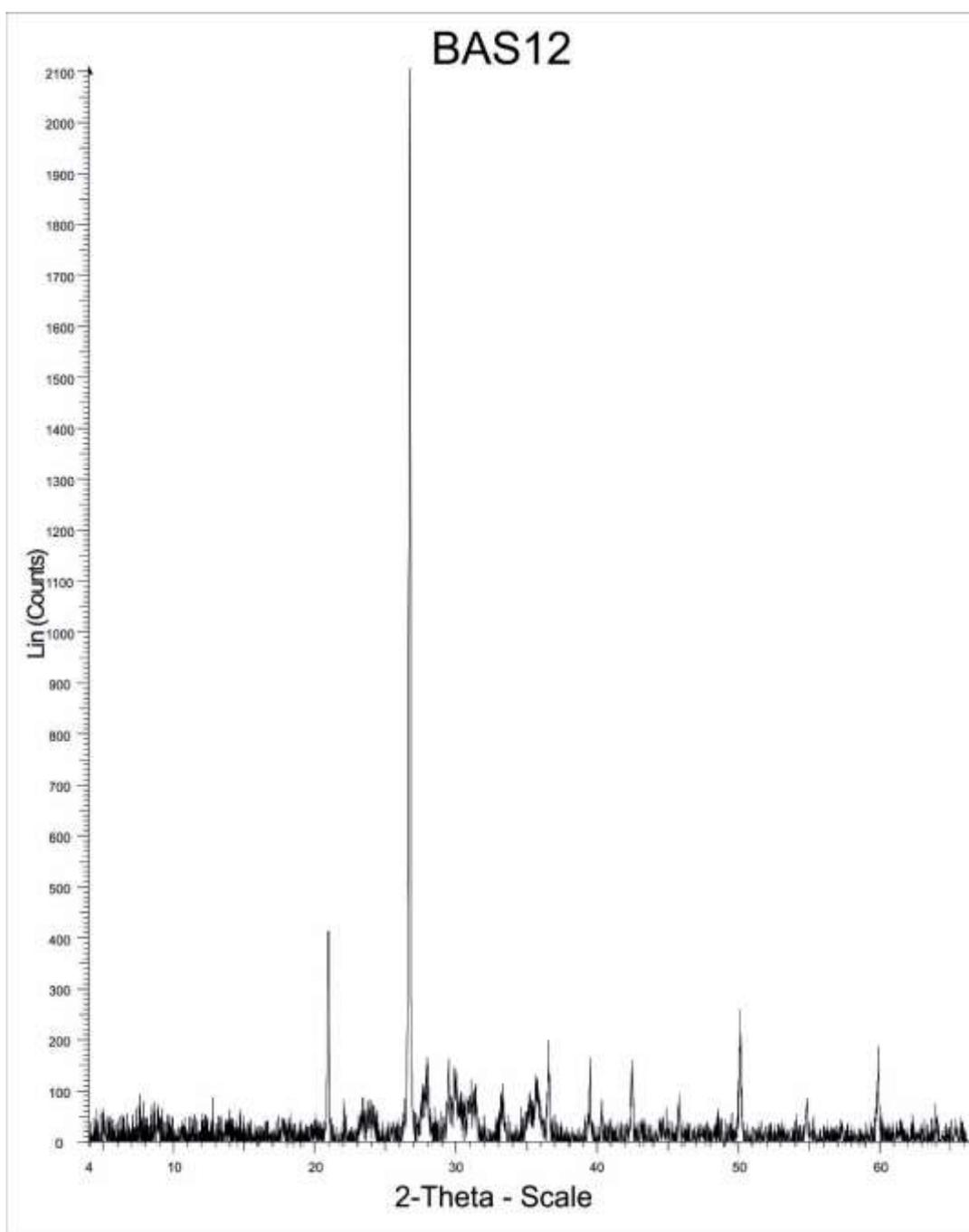


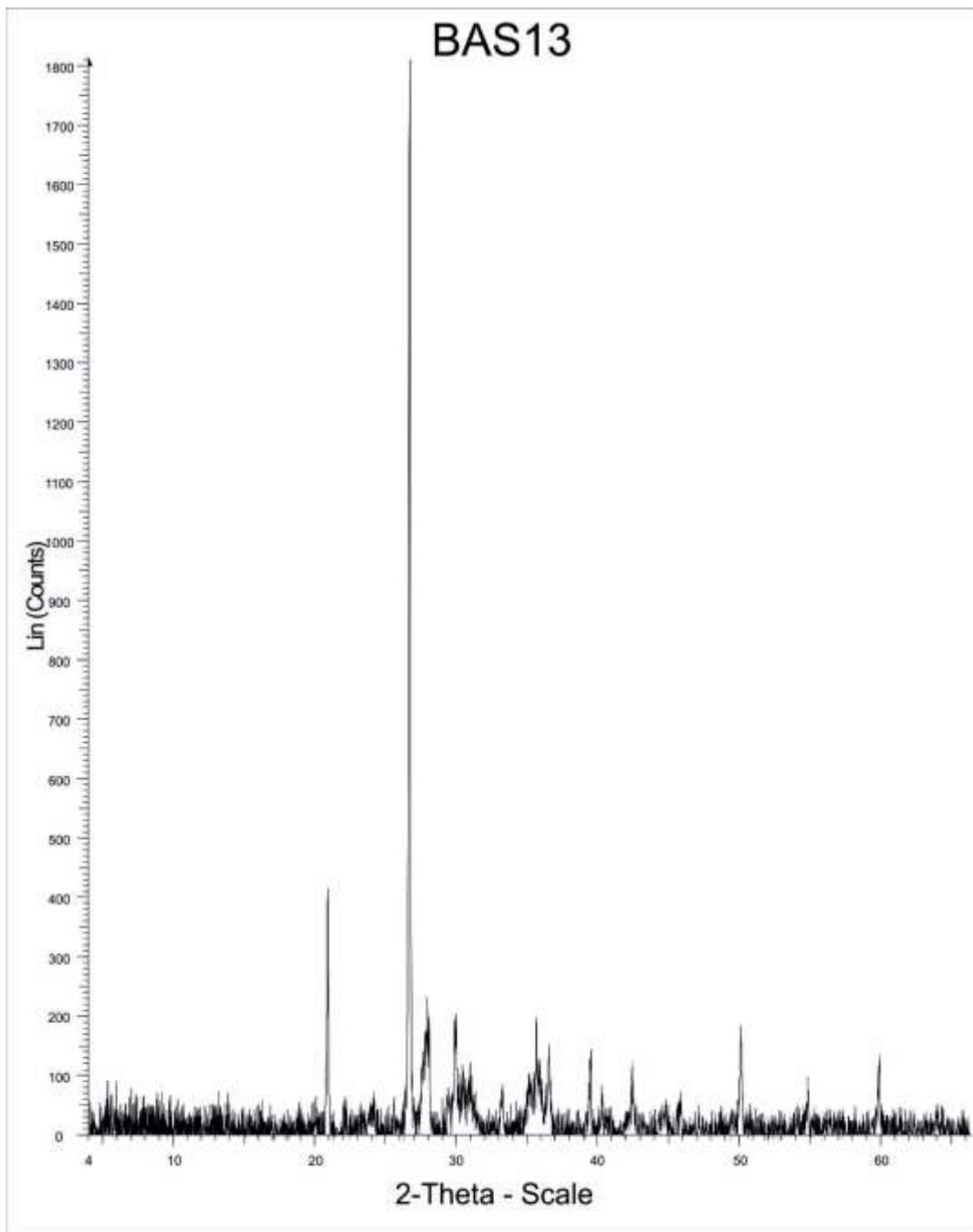


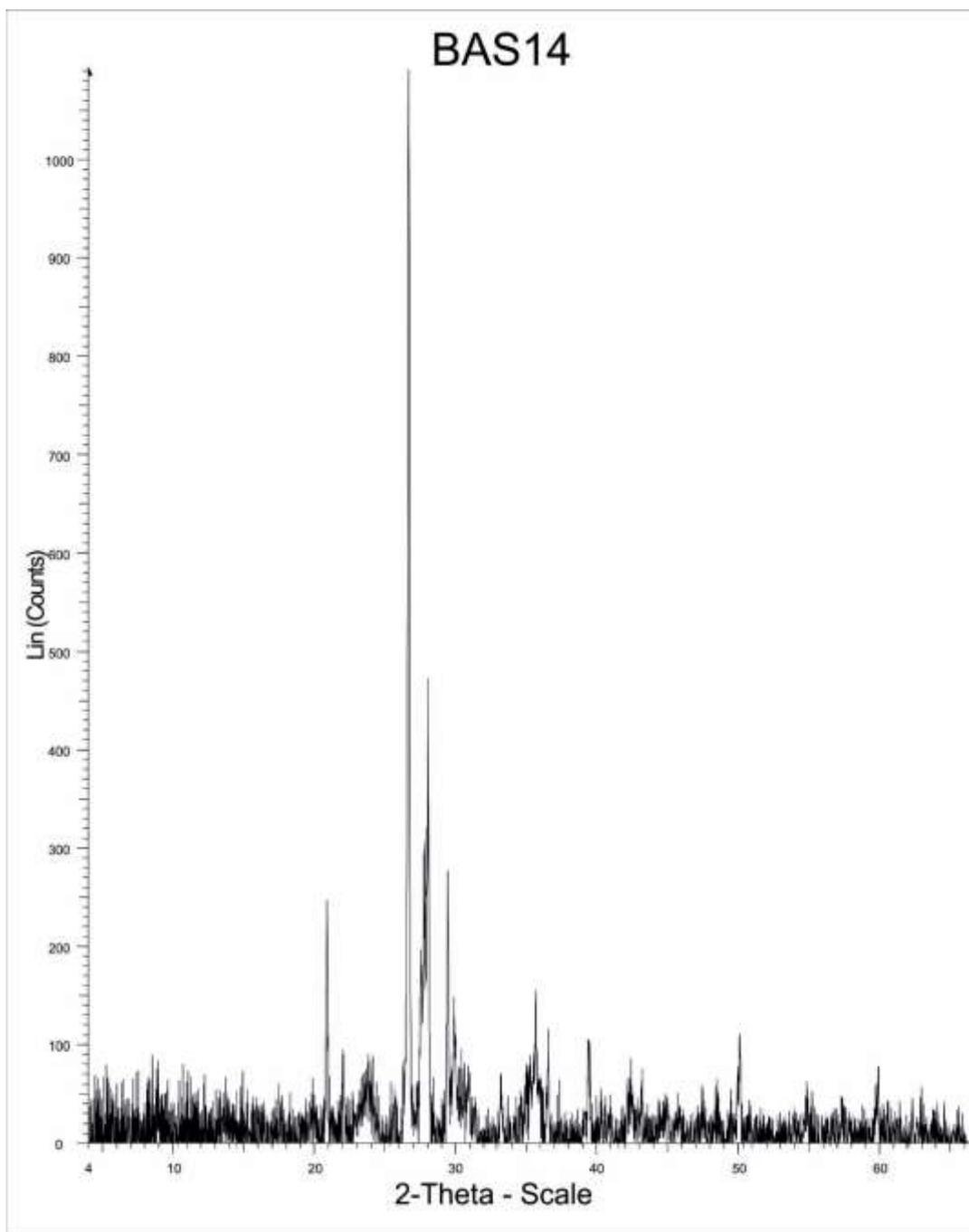


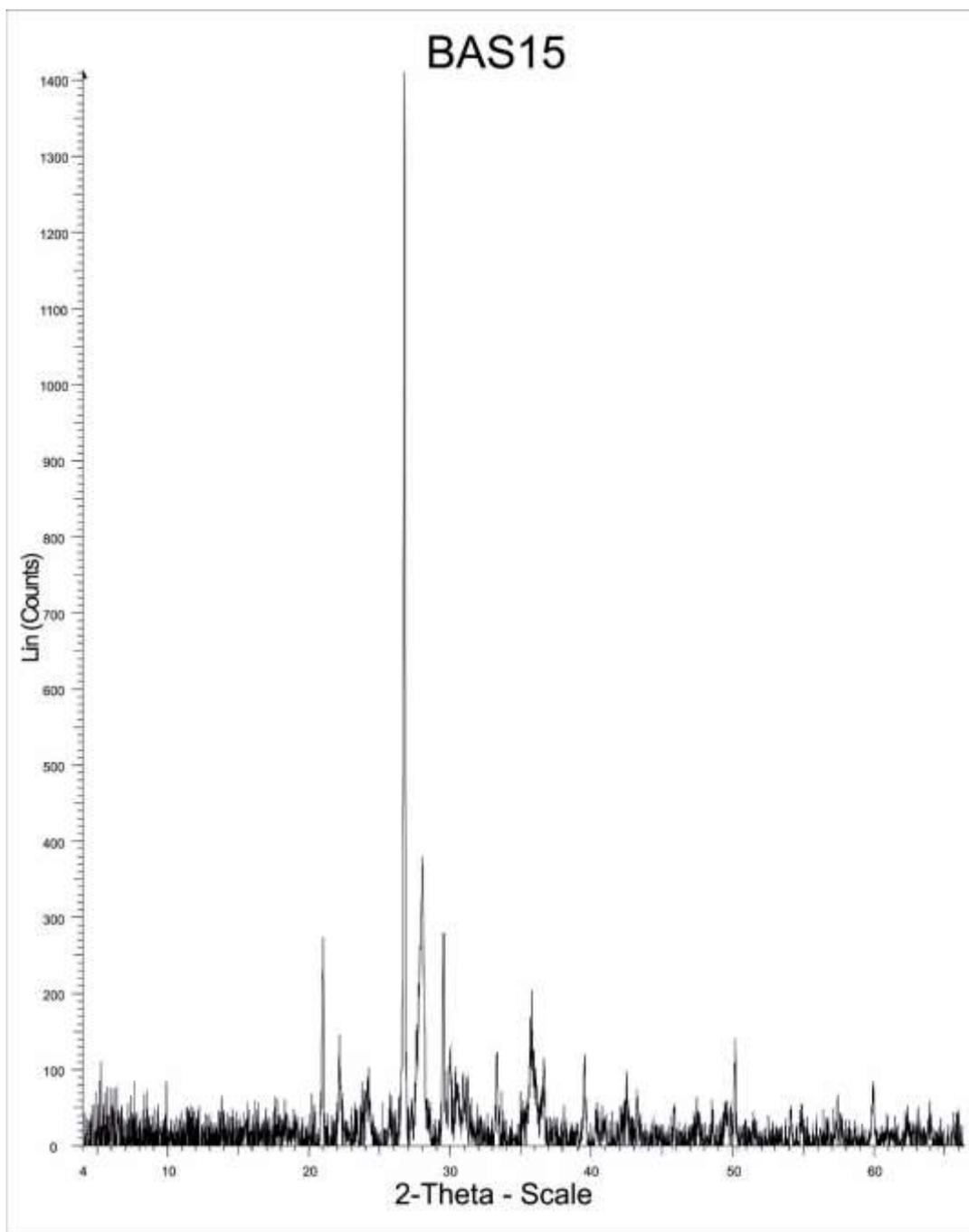


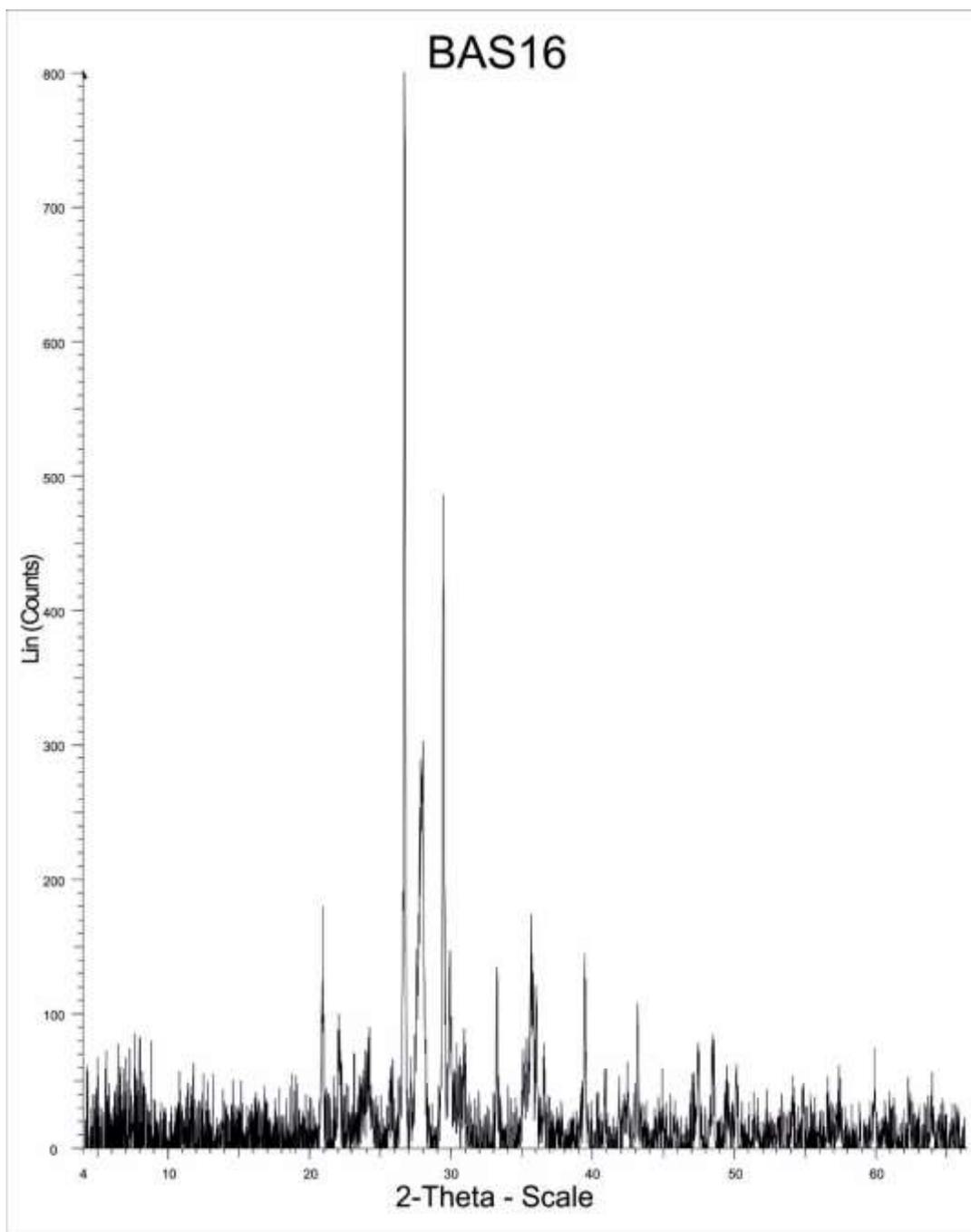


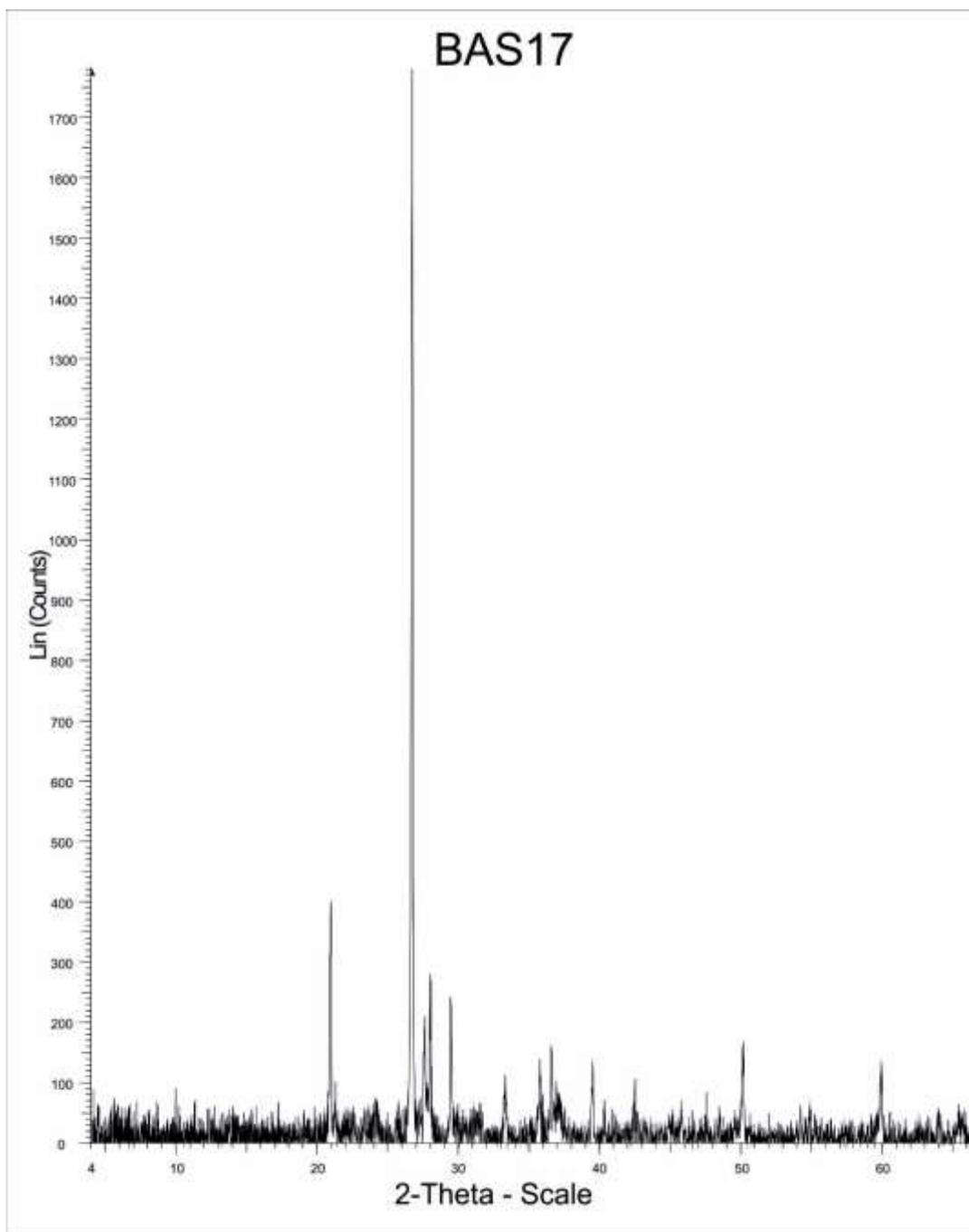


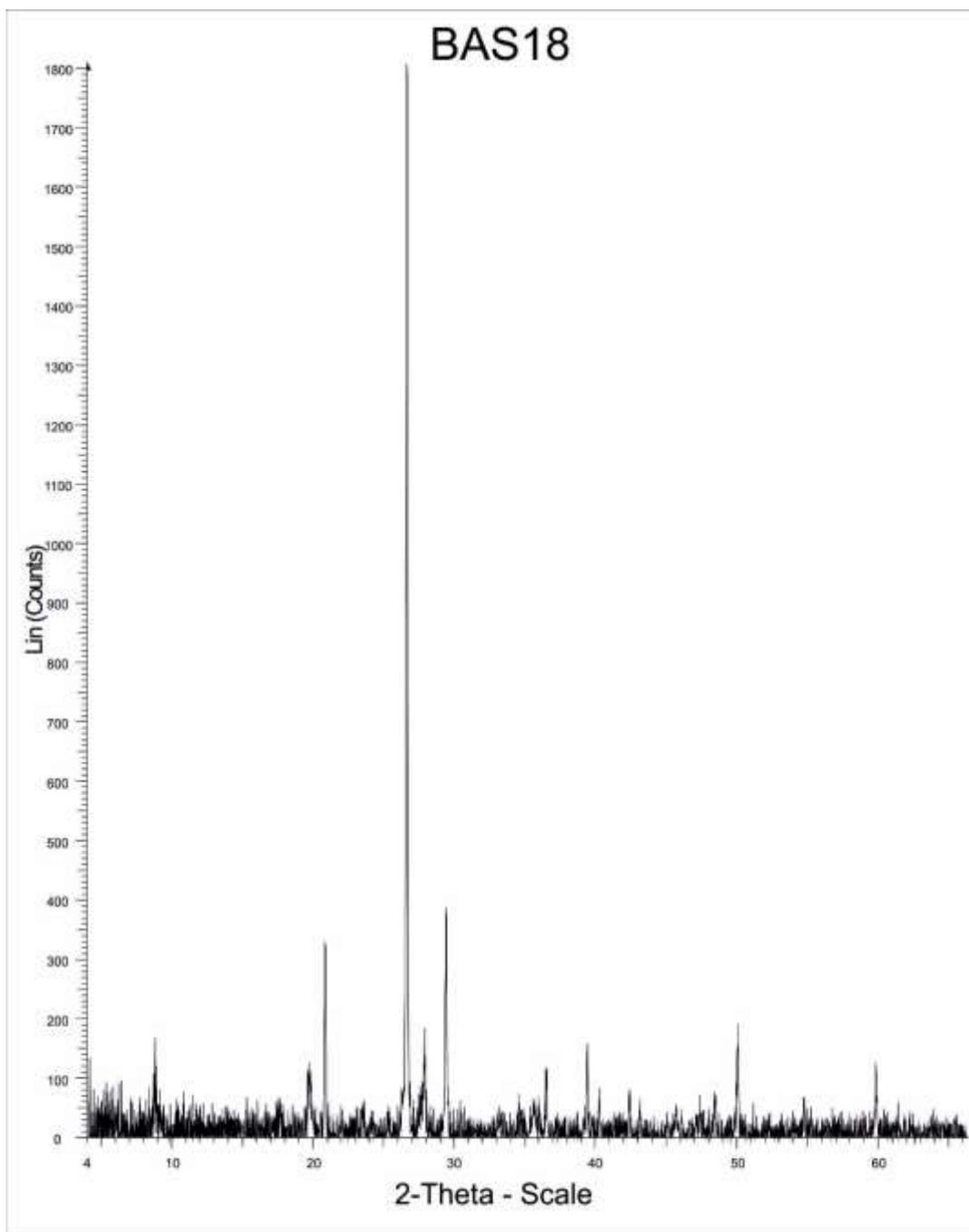


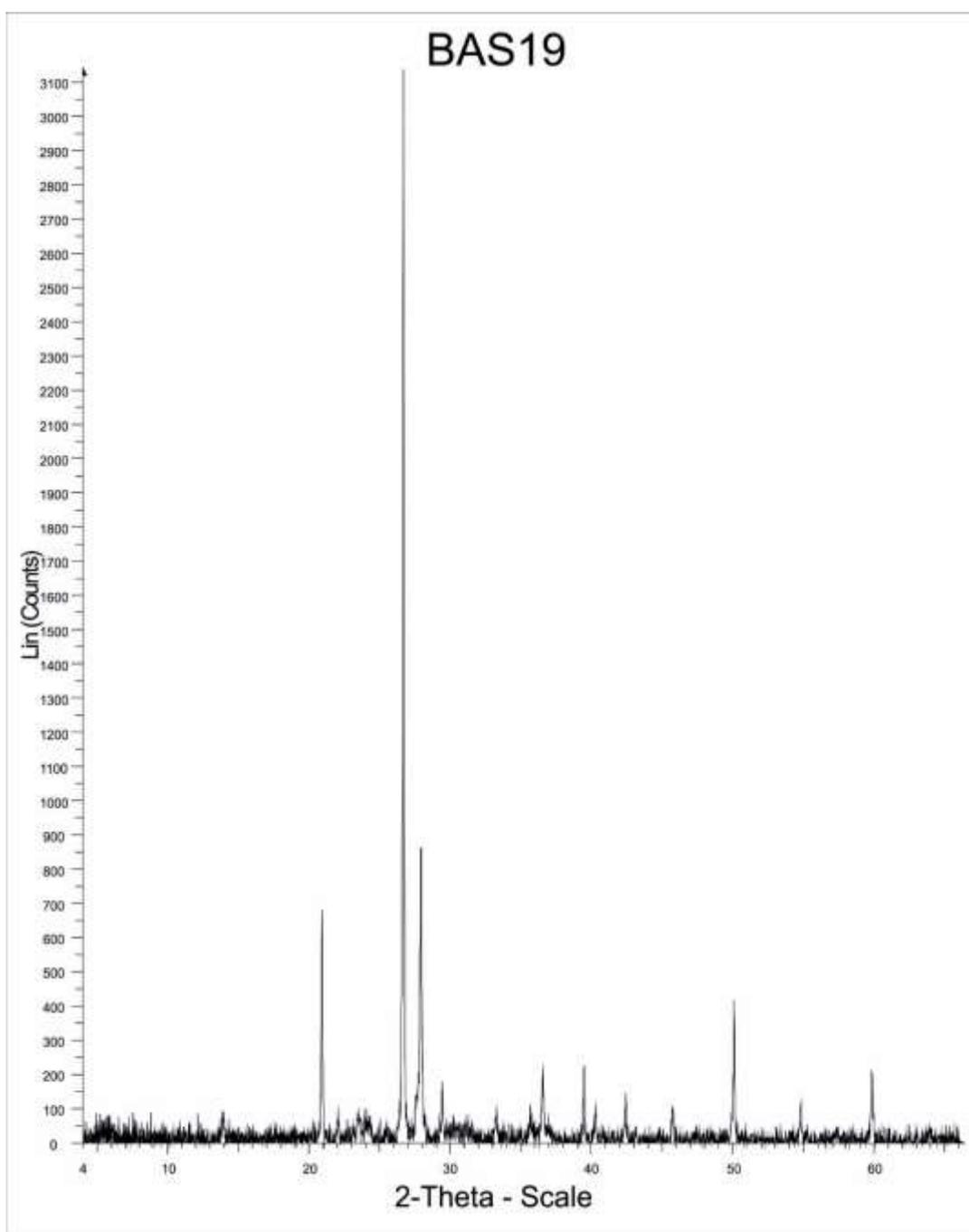


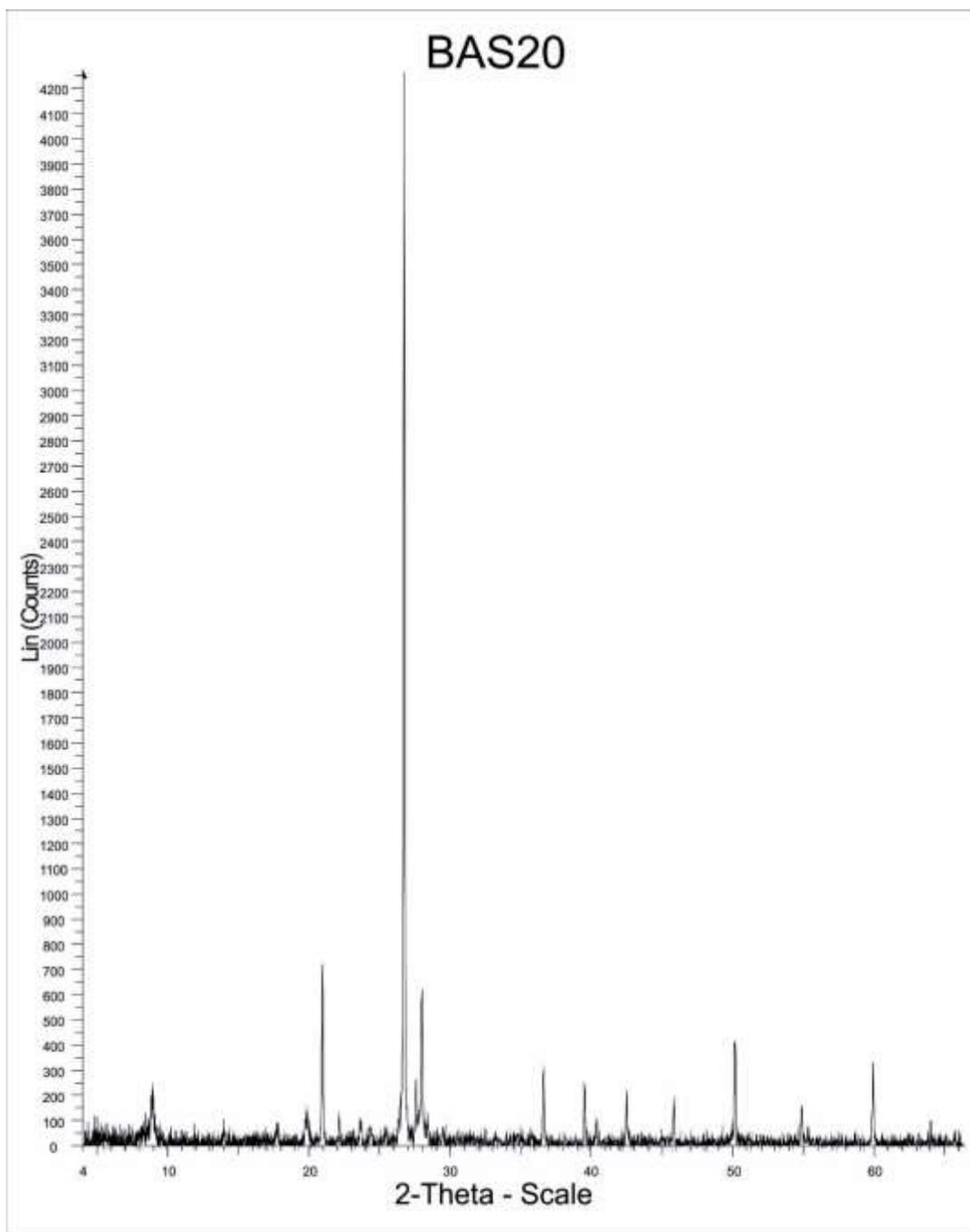


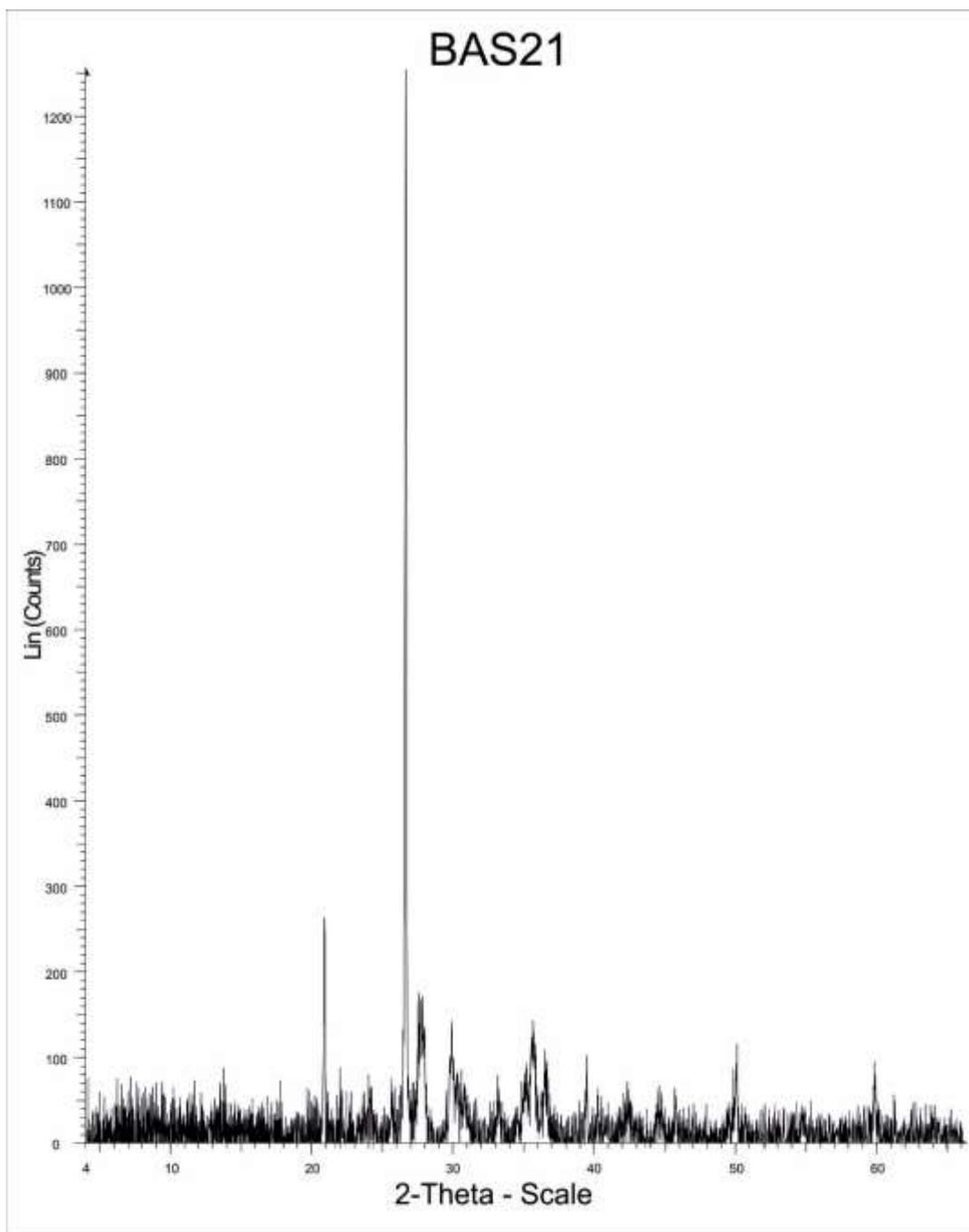


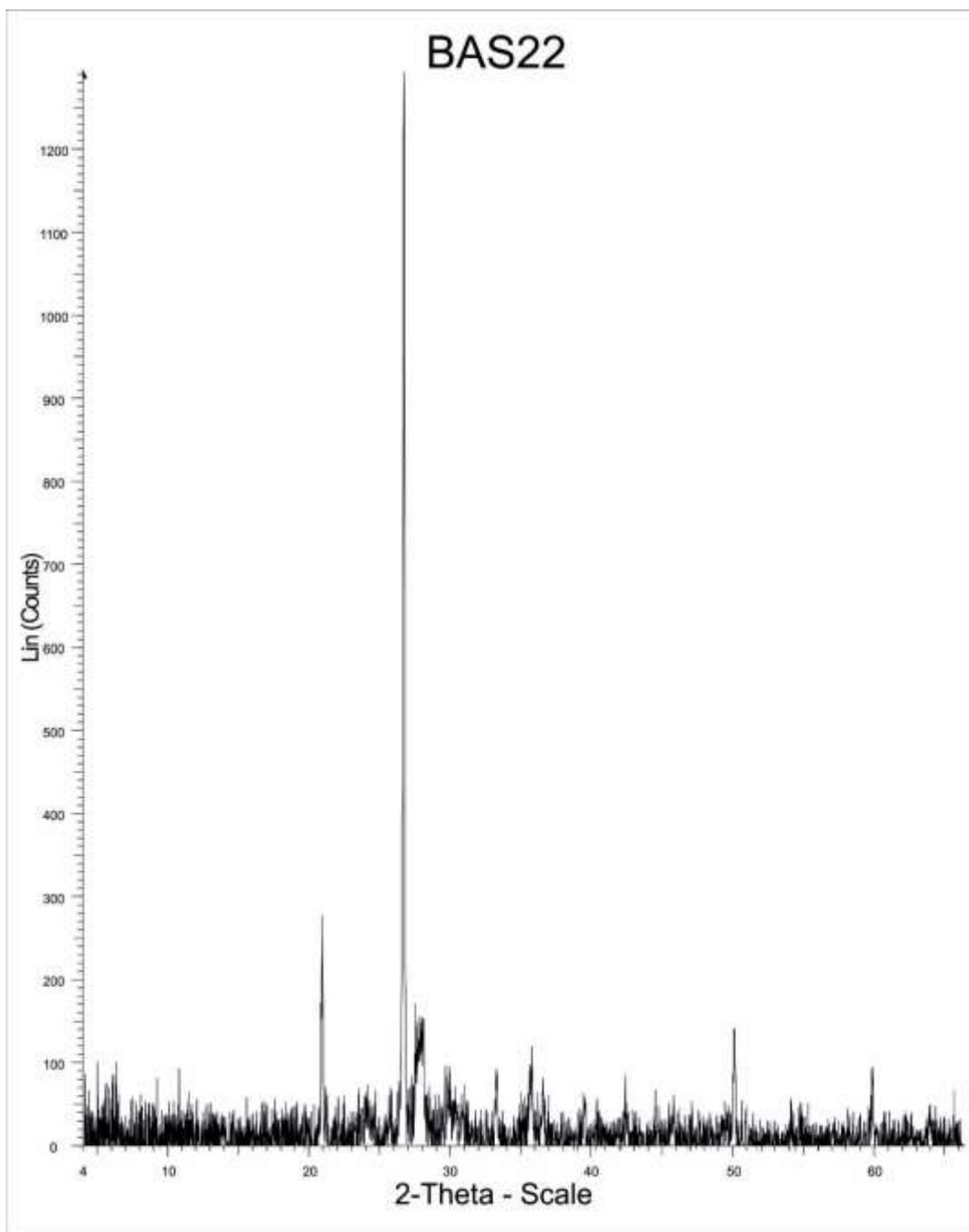


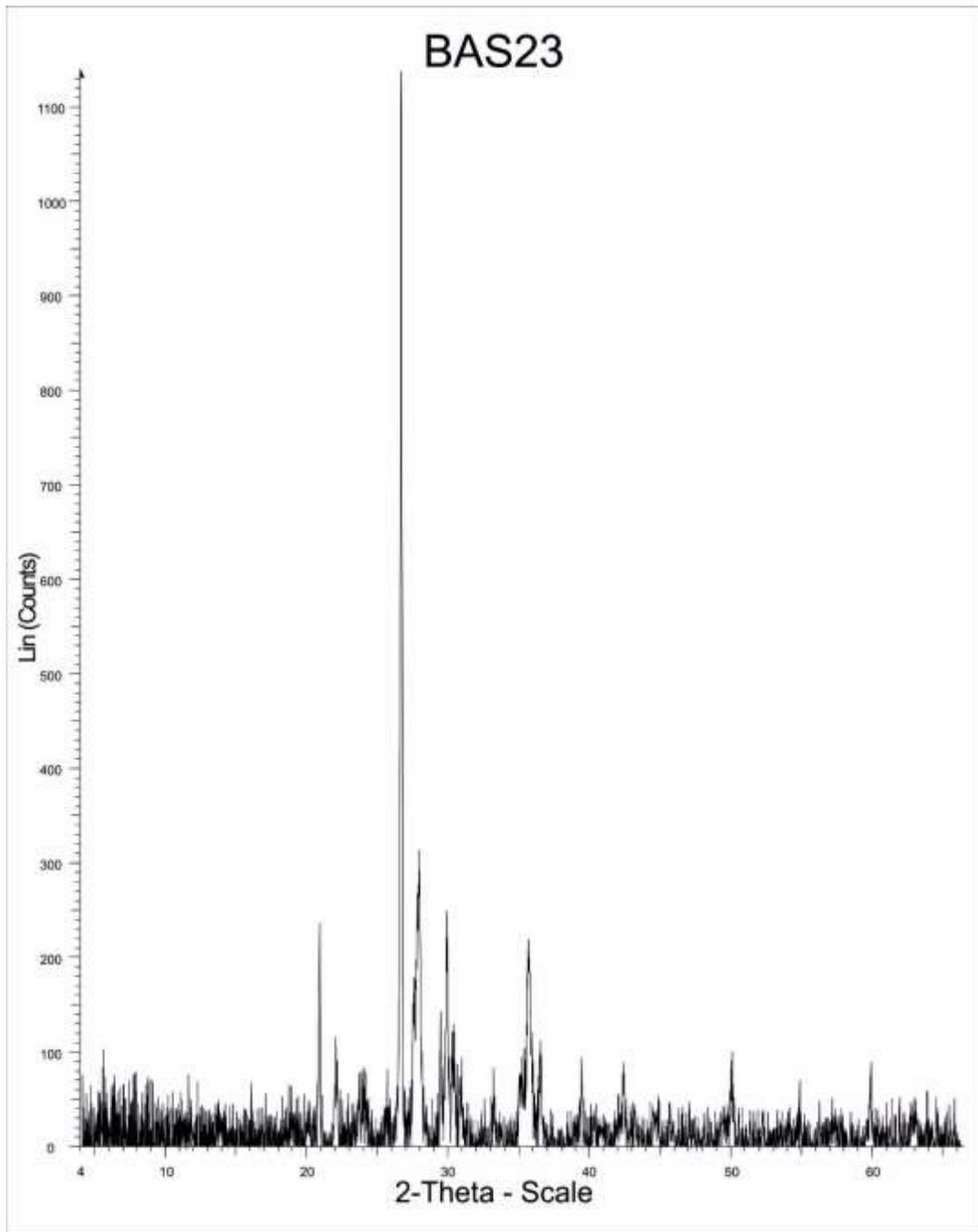


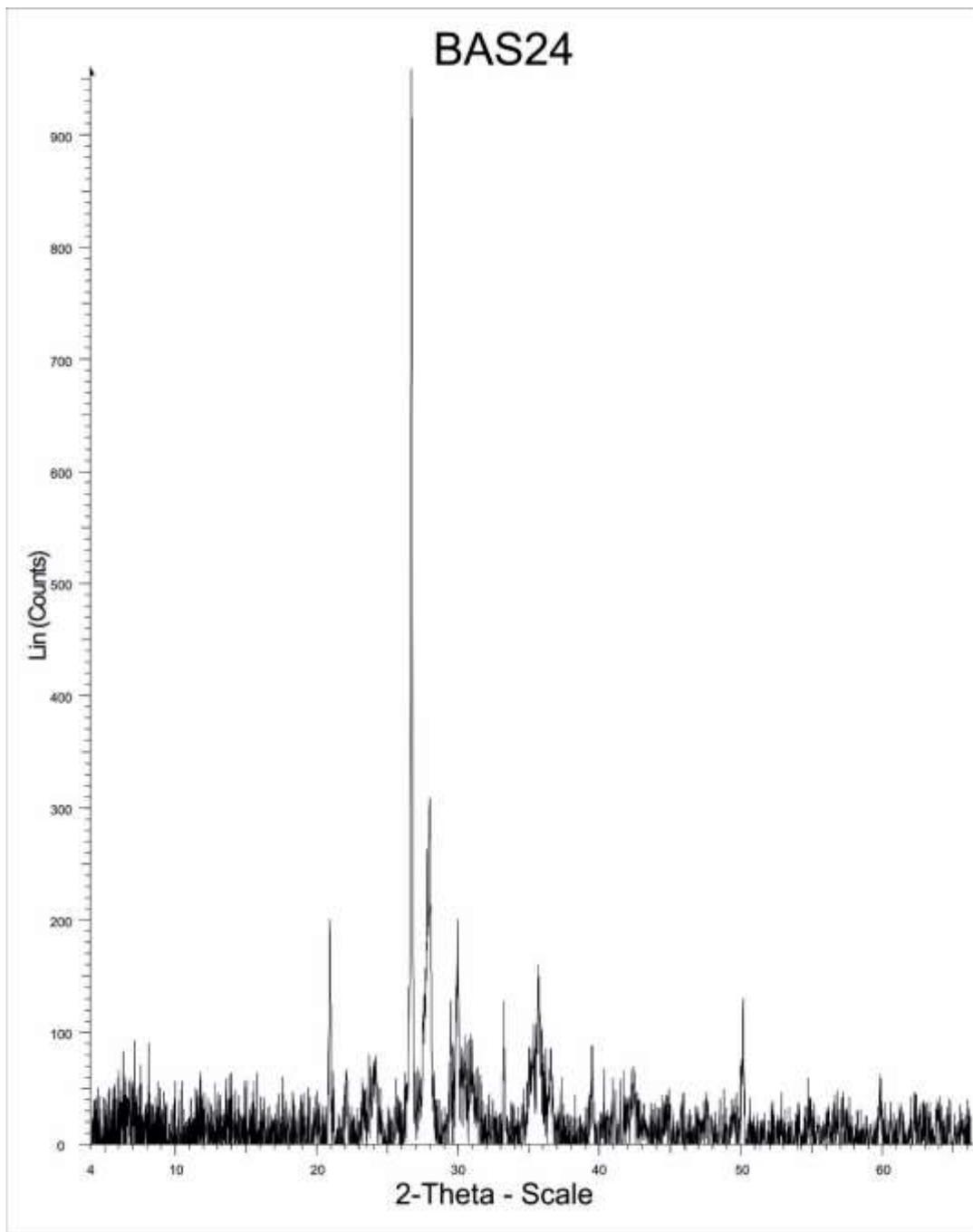


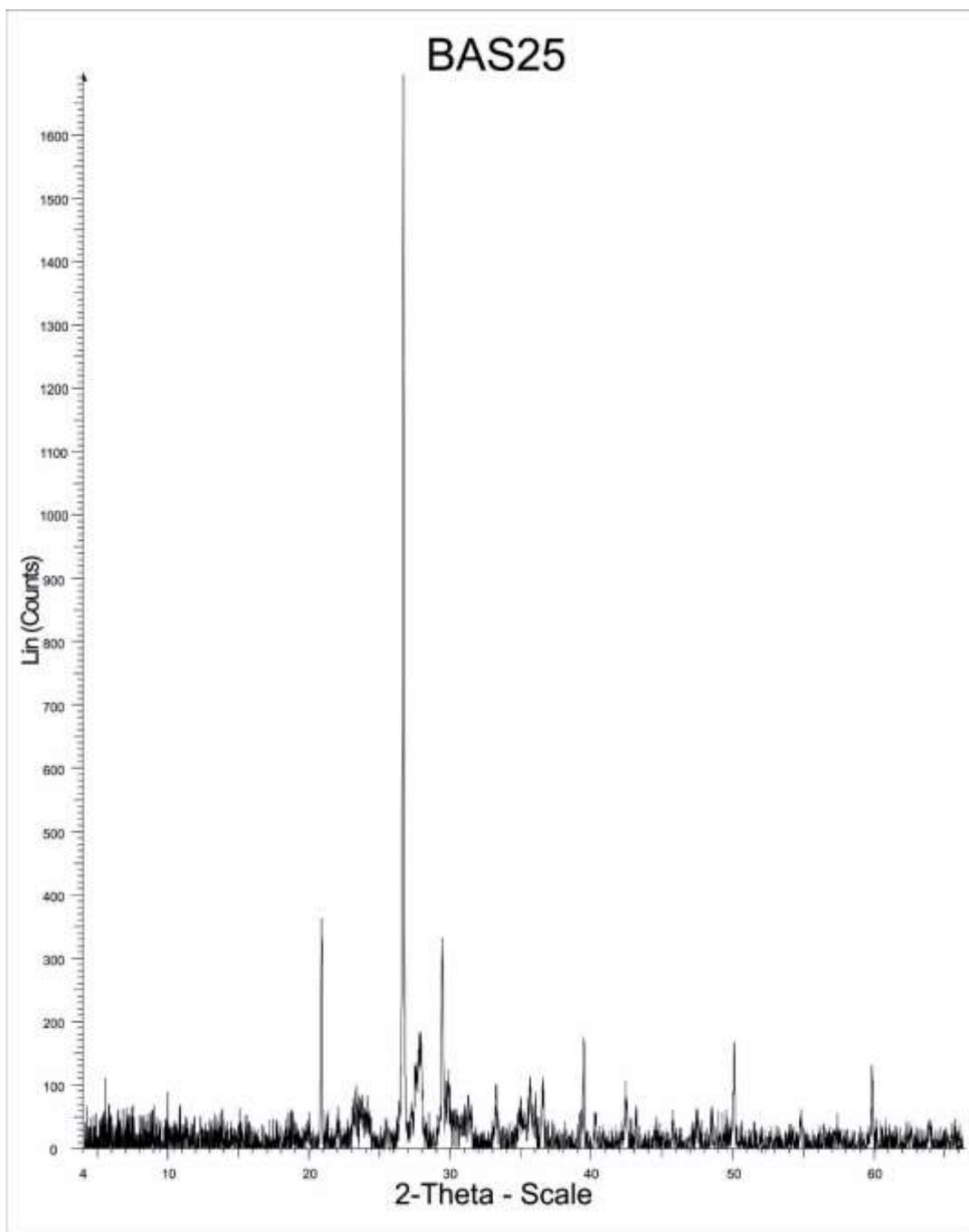


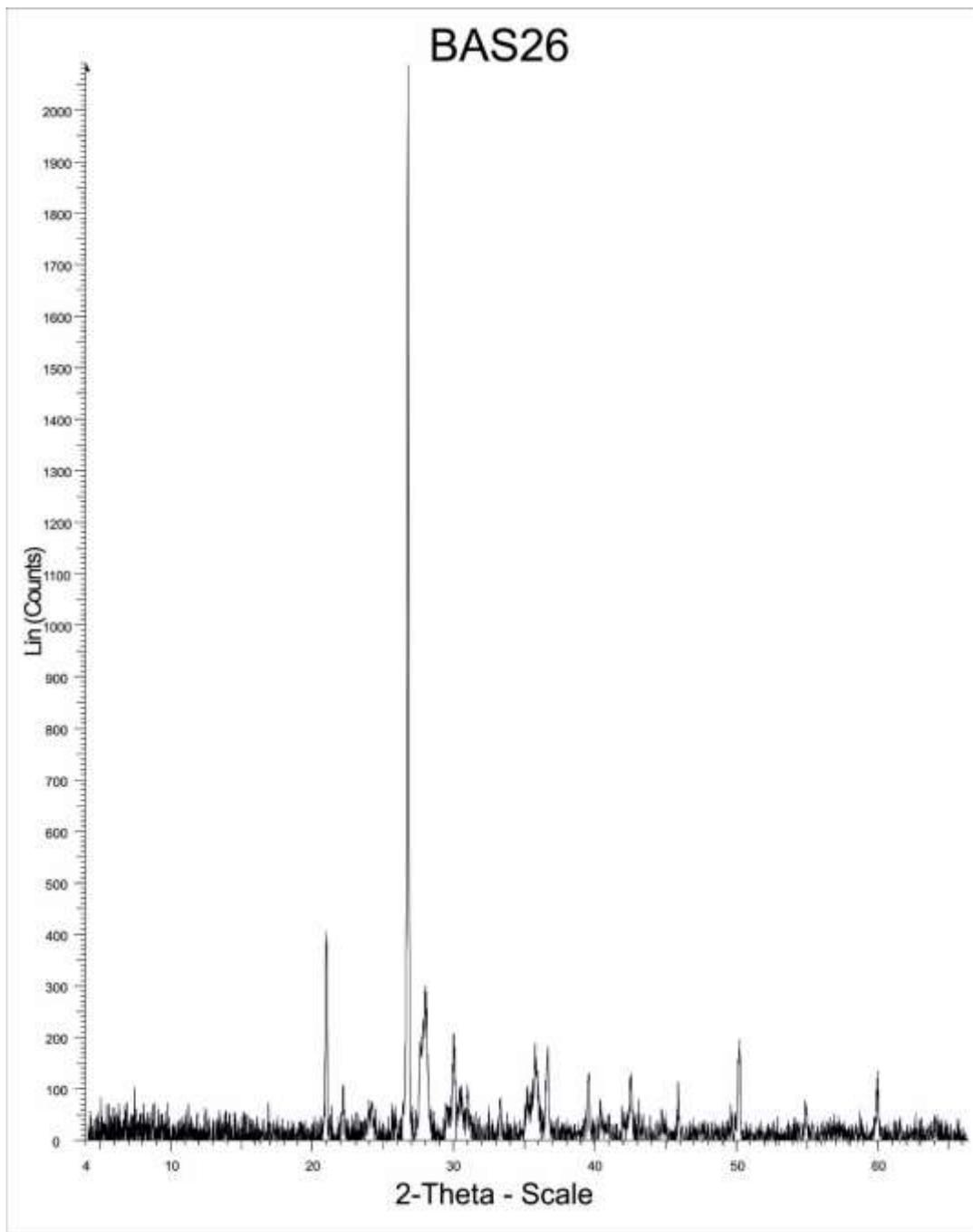


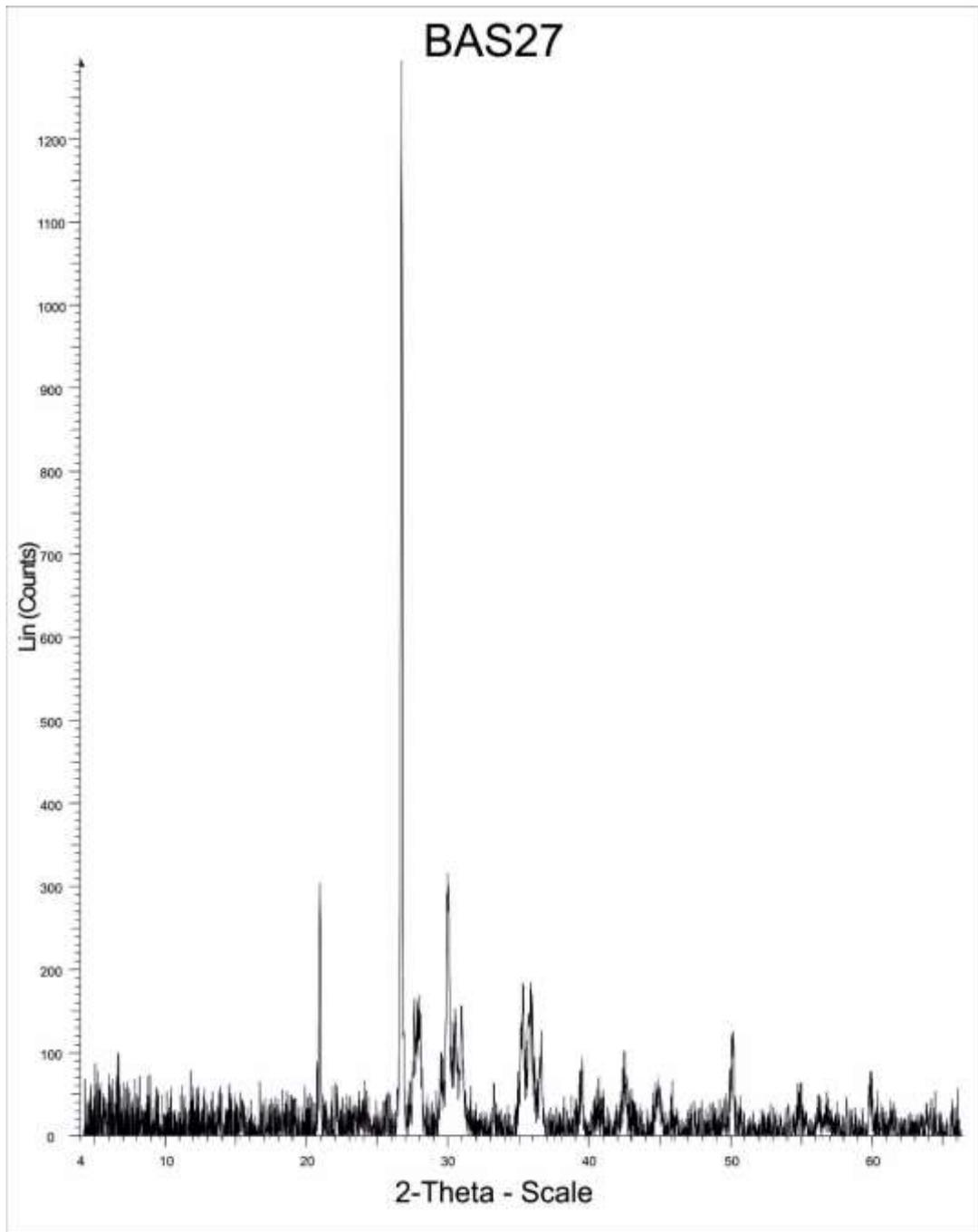


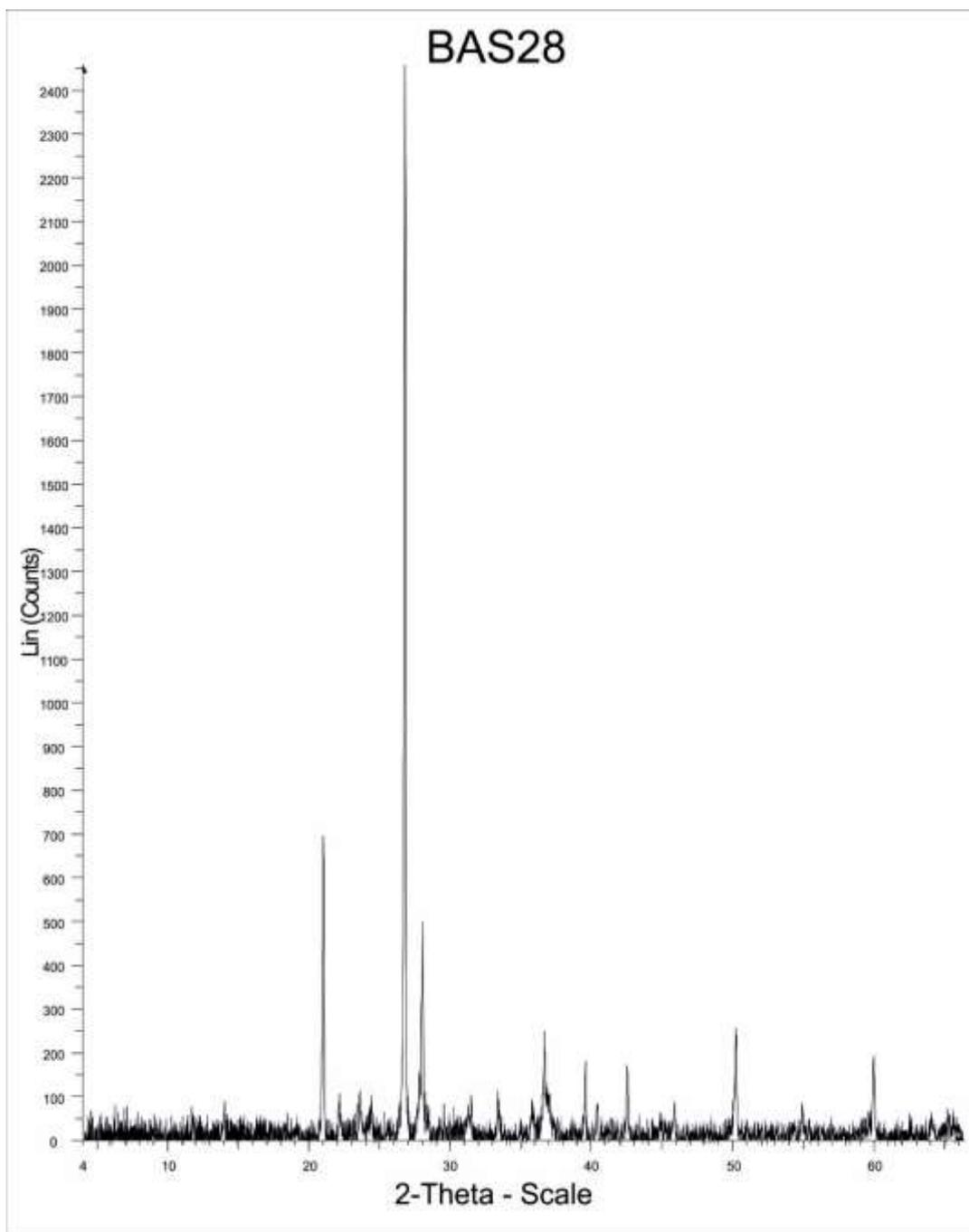


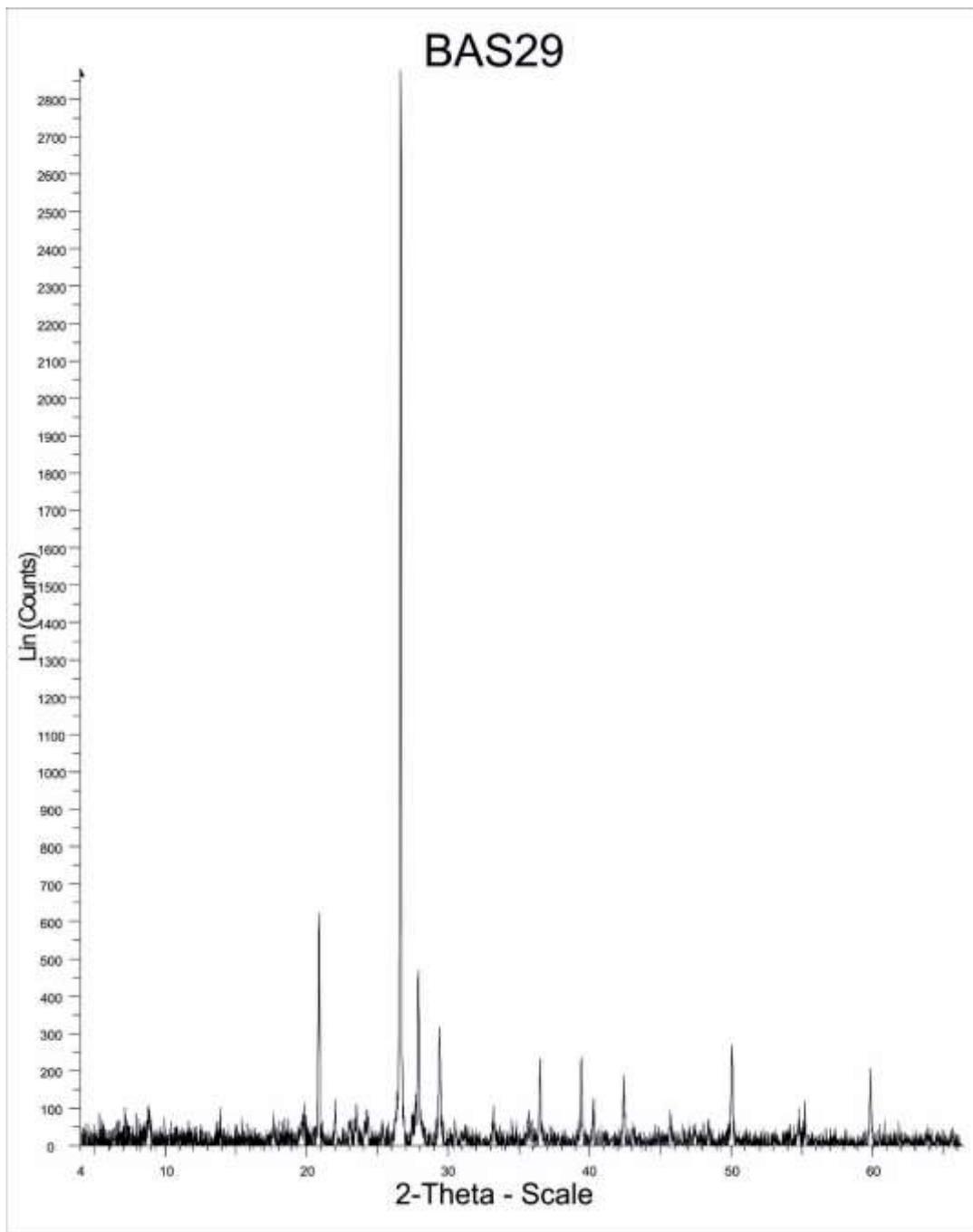












APPENDICE C

TERMOGRAVIGRAMMI

