

UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA



UNIVERSITA' DELLA CALABRIA

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

Scuola di Dottorato

“Archimede” in Scienze, Comunicazione e Tecnologie

Indirizzo

Scienze della Terra

CICLO XXVII

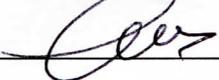
**COSTRUZIONE DI UN DATABASE GIS 3D PER UN APPROCCIO
MULTIDISCIPLINARE ALLA DIAGNOSTICA DI SANTA SOFIA
(ISTANBUL - TURCHIA)**

Settore Scientifico Disciplinare GEO/09

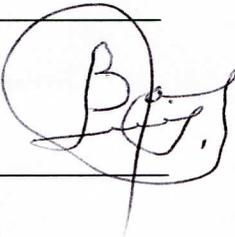
Direttore: Prof. Pietro Pantano



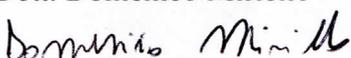
Supervisore: Prof. Gino Mirone Crisci



Co Tutor: Prof. Luis Barba



Dott. Domenico Miriello



Dottorando: Dott. Murat Cura



*Annem ve babama
Ai miei genitori*

INDICE

Introduzione	pag. 1
CAPITOLO 1	
Santa Sofia: cenni storico-architettonici	pag. 3
1.1 Costantinopoli e Santa Sofia	pag. 3
1.2 Evoluzione costruttiva dell'edificio	pag. 7
1.3 Descrizione dell'edificio	pag. 9
1.4 Cronologia storica, delle fasi costruttive e degli interventi di restauro	pag. 18
CAPITOLO 2	
Metodologie diagnostiche applicate in situ	pag. 26
2.1 Laser scanner	pag. 26
2.2 Rilievo fotografico per mezzo di Droni	pag. 29
2.3 Georadar (Ground Penetrating Radar - GPR)	pag. 32
2.4 Termografia IR	pag. 37
2.5 Endoscopia	pag. 40
CAPITOLO 3	
Campionamento e cenni sulle malte	pag. 43
3.1 Campionamento dell'edificio	pag. 43
3.2 Cenni su malte	pag. 47
3.3 Il processo produttivo di una malta	pag. 49
3.4 L'importanza dello studio delle malte	pag. 52

CAPITOLO 4

Metodologie diagnostiche applicate in laboratorio	pag. 54
4.1 Microscopia ottica a luce polarizzata trasmessa	pag. 54
4.2 Diffrattometria a raggi X su polveri (XRPD)	pag. 56
4.3 Spettrometria di fluorescenza a raggi X (XRF)	pag. 59
4.4 Microanalisi a dispersione di energia (SEM-EDS)	pag. 63
4.5 Microscopia elettronica a trasmissione (TEM)	pag. 64

CAPITOLO 5

Risultati e discussione dei dati	pag. 67
5.1 Acquisizione mediante Laser Scanner	pag. 67
5.2 Acquisizione mediante Droni	pag. 70
5.3 Risultati dell'indagine Georadar	pag. 76
5.3.1 Risultati dello studio della pavimentazione della navata centrale	pag. 76
5.3.2 Risultati dello studio delle gallerie del piano superiore	pag. 87
5.4 Risultati dell'indagine termografica	pag. 93
5.4.1 Indagine del distacco del rivestimento marmoreo	pag. 93
5.4.2 Indagine condotta sulla cupola, i pennacchi e tympana	pag. 95
5.5 Risultati dell'indagine mediante Endoscopia	pag. 103
5.6 Risultati dell'analisi composizionale delle malte	pag. 104
5.6.1 Studio petrografico delle malte e fasi costruttive	pag. 105
5.6.2 Composizione del legante delle malte	pag. 118
5.6.3 Alcune considerazioni sullo stato di conservazione delle malte	pag. 121

CAPITOLO 6

Costruzione del database GIS 3D	pag. 123
6.1 Generalità sui sistemi GIS	pag. 123
6.2 Descrizione del Software	pag. 128
6.3 Applicazione GIS su Santa Sofia	pag. 131
6.4 Strutturazione del lavoro	pag. 132

Conclusioni

pag. 137

Bibliografia

pag. 141

Ringraziamenti

INTRODUZIONE

Pur essendo il monumento più studiato di tutta la Turchia e Patrimonio dell'Umanità, la storia delle ricerche a Santa Sofia risente della mancanza di collegamento tra i vari dati ottenuti nel corso del tempo dai numerosi progetti di ricerca sia turchi che internazionali.

Scopo del presente lavoro è riuscire a mettere a disposizione della comunità scientifica un modello tridimensionale che rappresenti l'interfaccia di consultazione di un database interattivo multimediale, una piattaforma in cui potranno confluire tutti i dati che esistono sul monumento e che derivano dalle diverse ricerche condotte su Santa Sofia.

Il progetto si propone di realizzare tale modello tridimensionale e di applicare alcune metodologie diagnostiche già sperimentate in precedenza (Mark et al., 1993; Güleç, 1996; Moropoulou et al., 1998; Bartoli, 2001; Takayama et al., 2001; Moropoulou et al., 2002; Bianchini e Paolini, 2003; Ducci, 2003; Cura M., 2010; Moropoulou e Polikreti, 2010; Wenzel e Duppel, 2010; Sasaki e Hidaka, 2011; Yamaoka et al., 2011; Ishizaki et al., 2012; Koizumi et al., 2012; Moropoulou et al., 2012a, 2012b; Ogura et al. 2012; Sasaki et al. 2012; Moropoulou et al., 2013; Ogura et al. 2013; Sasaki. et al. 2013a, 2013b) al fine di fornire contenuti al database stesso e contribuire alla conoscenza e conservazione di Santa Sofia.

Questo database eviterà la moltiplicazione delle attività, e soprattutto, cosa ancora più importante, permetterà l'integrazione dei dati per elaborare una migliore diagnostica delle condizioni del monumento e per prendere decisioni migliori relative agli interventi da effettuare.

La proposta è che nel database interattivo, la "storia" della Basilica possa essere sia "raccontata" attraverso l'acquisizione dei dati pregressi, che "scritta" con i dati delle future ricerche che andranno a confluire in questo archivio digitale.

Il database proposto non dovrà quindi essere solo un contenitore di dati, ma anche delle metodologie e delle tecnologie adottate nel corso dei secoli e potrà essere finalizzato non solo a scopi di ricerca scientifica ma anche alla progettazione di interventi di restauro della struttura e al suo monitoraggio, le cui diverse soluzioni (posizionamento di sensori GPS, analisi del microclima, ecc.), costituiranno una nuova e continua fonte di dati in tempo reale.

Tale database prevederà la collocazione spaziale dei dati dell'archivio digitale ed avrà come base per la sua impostazione il modello 3D del monumento.

Benché tale progetto sia ambizioso, è necessario al fine della comprensione del monumento e della sua tutela, perché permetterà di rendere disponibili, in un unico supporto, i dati provenienti da ricerche effettuate in ambiti disciplinari diversi e spesso divulgati in pubblicazioni e/o report dispersi. Permetterà inoltre di centralizzare e verificare i dati ottenuti, mantenendoli sempre aggiornati. Il database dovrà essere, infatti, costantemente *in progress*.

Questo lavoro vuole inoltre rappresentare un esempio di approccio multidisciplinare per l'applicazione di diverse metodologie scientifiche (GPR, XRPD, OM, SEM-EDS, XRF, TEM, Laser Scanner, Termografia), capace di fornire dati inediti sui materiali di Santa Sofia (in particolare le malte) e sulla statica del monumento stesso. I dati prodotti dalla combinazione di diverse tecniche analitiche, applicate sia in situ, che in laboratorio, possono aiutare a ricostruire anche la storia costruttiva della basilica, dando informazioni sulle strutture sepolte e sui confini reali tra le varie fasi costruttive registrate dalle tessiture murarie e ormai nascoste dagli intonaci che li ricoprono totalmente.

CAPITOLO 1

SANTA SOFIA: CENNI STORICO-ARCHITETTONICI

1.1 Costantinopoli e Santa Sofia

Costantinopoli, l'attuale città di Istanbul, è posta sulle due rive del Corno d'oro, tra il Mar di Marmara e il Bosforo (Fig. 1.1) e rappresenta il maggior centro urbano della Turchia. Già nel VII secolo a.C., i coloni greci si stabilizzarono nel luogo, creando la colonia di *Byzantion* ed erigendo l'acropoli sulla cresta del promontorio.

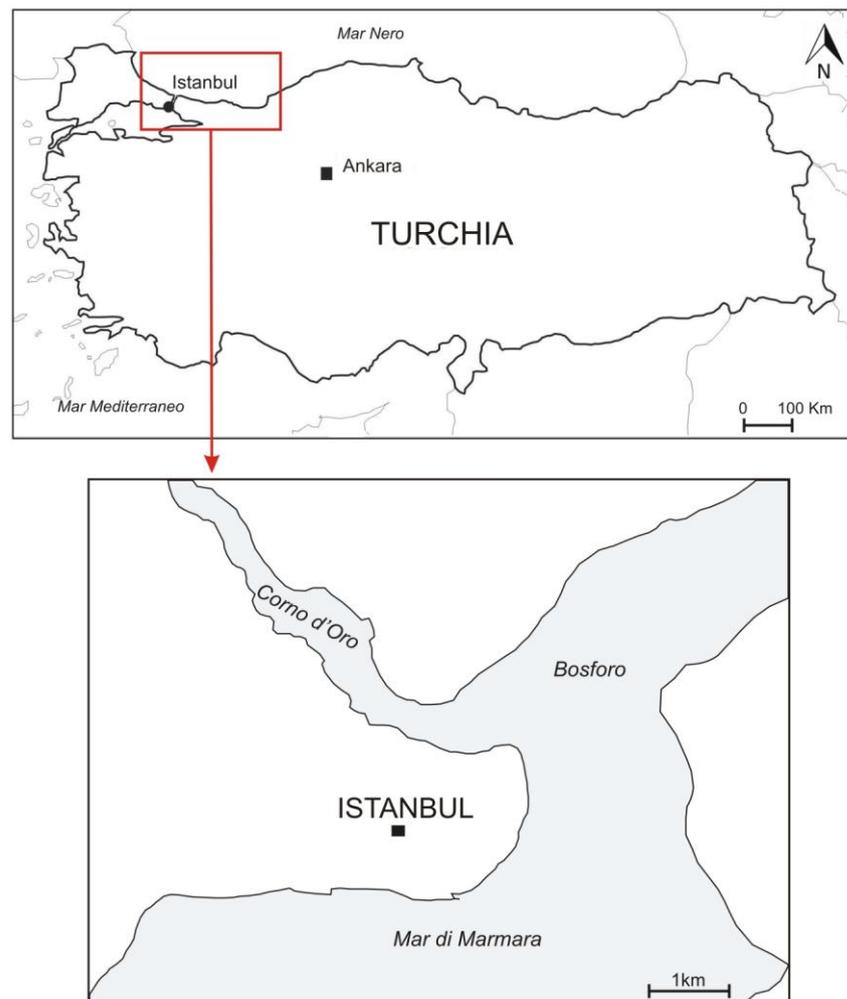


Fig. 1.1. Mappa della Turchia con localizzazione della città di Istanbul.

Nel II secolo d.C. *Byzantion* fu conquistata dall'imperatore Settimio Severo, divenendo così la città romana di *Byzantium* o Colonia Antonina. A quel tempo non era ancora un centro importante, ma dopo la vittoria su Licinio nel 324, Costantino, divenuto unico governante dell'impero, scelse quella città, ormai romanizzata, come la nuova capitale d'Oriente: la Nuova Roma, o Costantinopoli (Mainstone, 2009).

La città fu dunque fondata dall'imperatore Costantino nel IV secolo d.C. come palcoscenico dell'autorità imperiale e luogo della manifestazione del potere assoluto del monarca divino.

La città, come Costantino la trovò nel 324, era relativamente piccola; chiusa dalle mura entro un'area che era poco più di un ventesimo di quella di Roma e con una popolazione, in proporzione, ancora meno numerosa. La priorità fu dunque data alla costruzione di infrastrutture urbane e governative essenziali, come le abitazioni, il palazzo, la sede del senato, le terme e perfino un grande ippodromo (Mainstone, 2009). In poco tempo Costantinopoli divenne una grande realtà di carattere economico, configurandosi come un grande emporio, grazie alle forze economiche in gioco: la corte, la burocrazia e la chiesa.

La città iniziò subito a raccogliere nel circuito delle sue mura, nel tessuto urbano dei suoi prestigiosi palazzi e nella ricchezza delle sue biblioteche, tutte le sapienze ingegneristiche e le competenze sui materiali che caratterizzavano la civiltà ellenistica, di cui la "nuova Roma" fu piena erede. La dimostrazione di tutto ciò è rappresentata dal maestoso edificio di Santa Sofia (Fig. 1.2), voluto dall'imperatore Giustiniano che intendeva edificare un tempio che potesse gareggiare con il Tempio di Salomone a Gerusalemme, centro ideale della cristianità.

Realizzando una combinazione di forme strutturali ardite e senza precedenti, gli architetti di Giustiniano crearono uno spazio interno smisurato, che con le sue ampie volte e la compenetrazione di ambienti rarefatti rimane tuttora insuperato e non ha mai cessato di creare nel visitatore eccitazione e meraviglia (Mainstone, 2009).

Il maestoso edificio di Santa Sofia è posto sulla cresta del promontorio che dall'Europa si proietta verso l'Asia, dove il mar di Marmara si restringe per immettersi nel profondo e stretto canale del Bosforo. Il mar di Marmara lambisce il promontorio a sud, di fronte alla costa asiatica, mentre a nord si estende il lungo porto naturale del Corno d'Oro, un tempo rifugio delle navi colpite dalle tempeste (Mainstone, 2009).



Fig. 1.2. Veduta dell'edificio di Santa Sofia oggi.

Nell'immagine in Fig. 1.3, raffigurante un'antica mappa di Costantinopoli risalente al XV secolo d.C., Santa Sofia è il grande edificio a cupola sulla destra, nei pressi delle mura litoranee. Sotto di essa è visibile l'Ippodromo, mentre il mare di Marmara si estende in basso ed il Corno d'Oro attraversa la mappa in alto. In alto a destra è inoltre visibile il Bosforo, collegato al Mar Nero (Mainstone, 2009).

La chiesa di Santa Sofia (Fig. 1.4), ovvero della Divina Sapienza, fu consacrata la prima volta nel 537 e assunse la sua forma definitiva nel 562, dopo che fu ricostruita la cupola centrale. La chiesa rappresentò per quasi un millennio sia il centro della vita religiosa dello Stato bizantino sia lo scenario di buona parte dei suoi fasti e rituali. Oggi, benché l'edificio sopravviva solo come Museo, notevolmente impoverito dalla perdita di tutti gli arredi cristiani, di buona parte dell'ambiente originario e della sua atmosfera, riesce ugualmente ad imporsi come la massima espressione architettonica dell'Oriente cristiano e come uno dei più grandi capolavori di tutti i tempi per soluzioni architettoniche e strutturali (Mainstone, 2009).

La spazialità di Santa Sofia è un elemento di grande importanza che riesce a riunire tre culture: quella cristiana, quella ebraica del tempio salomonico e quella islamica delle grandi moschee. Santa Sofia rappresenta perciò un grande e potente simbolo di unione delle tre religioni abramiche che conferiscono alla città di Costantinopoli un valore peculiare sul piano etico, ideologico e sul piano dell'immagine per più religioni.

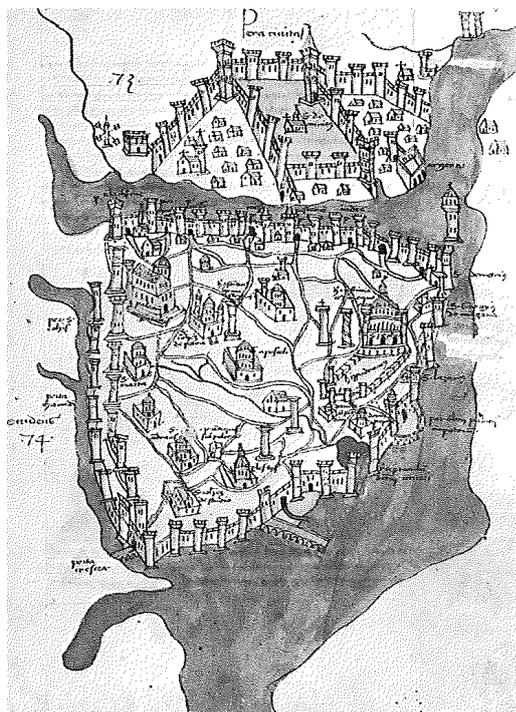


Fig. 1.3. Antica mappa di Costantinopoli risalente al XV secolo [da Cristoforo Buondelmonte, *Liber insularum archipelagi*, Bibliothèque Nationale, Paris, Cod. Lat. 4825. (Mainstone, 2009)].

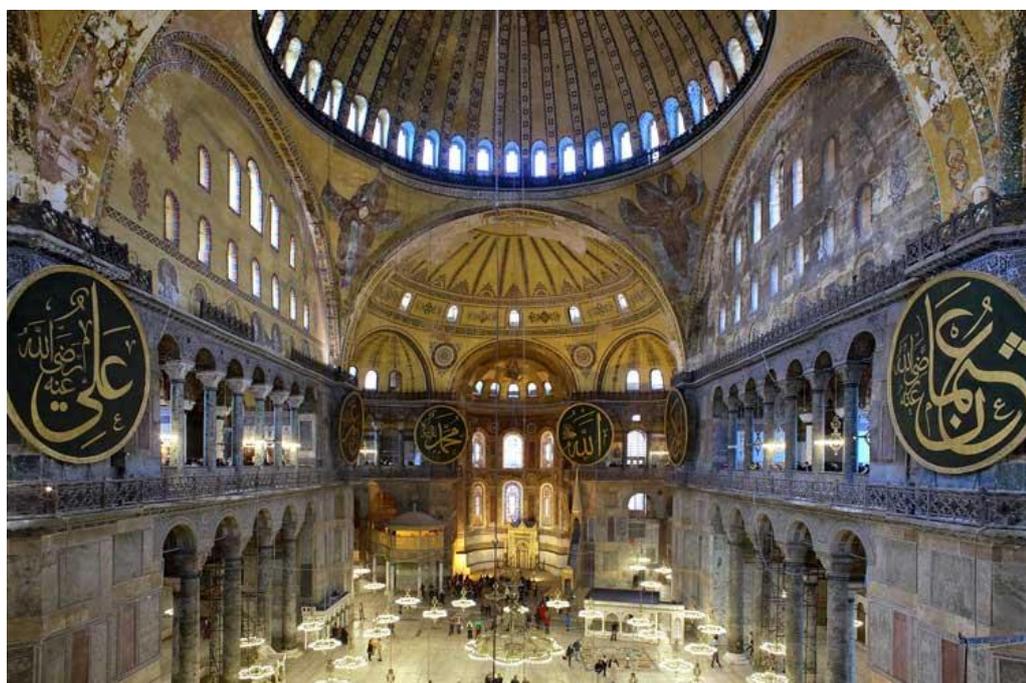


Fig. 1.4. Interno attuale di Santa Sofia.

1.2 Evoluzione costruttiva dell'Edificio

La storia di Santa Sofia risulta particolarmente densa e ricca di eventi. Questi possono essere riassunti in quattro importanti fasce temporali cui corrispondono altrettante fasi costruttive (Mainstone, 2009).

- 1) Dal IV al V secolo d.C.: Nel 360, durante il regno di Costanzo, fu consacrata una Grande Chiesa, quella che viene definita *prima chiesa*. Questa doveva fungere da cattedrale e fu edificata in un'area limitrofa all'attuale posizione (in prossimità di *Palazzo Topkapi*). Le ipotesi di paternità del primo impianto di Santa Sofia sono alquanto discordanti in quanto, secondo alcune fonti, la stessa deve i natali a Costantino, padre di Costanzo II, al quale, di contro, risulterebbe attribuibile la sola consacrazione della chiesa (Mainstone, 2009). Durante i disordini scoppiati in seguito alla cacciata di Giovanni Crisostomo nel 404, la chiesa fu incendiata e completamente rasa al suolo.
- 2) Dal V al VI secolo d.C.: fu ricostruita la *seconda chiesa* per volere di Teodosio II. La basilica fu progettata dall'architetto Rufino ed inaugurata nel 415. Anche in questo caso un incendio, scoppiato durante la rivolta di Nika contro l'imperatore Giustiniano I, ne causò la distruzione nel 532.
- 3) Dal VI al XIV secolo d.C.: l'imperatore Giustiniano I iniziò i lavori di costruzione di una nuova struttura più grande e più maestosa rispetto alle precedenti, inaugurata il 27 Dicembre del 537, dopo meno di sei anni di lavori, a firma del fisico e matematico Antemio di Tralle e dell'architetto Isidoro di Mileto. L'imperatore fece venire il materiale da tutto l'impero: colonne ellenistiche dal tempio di Artemide di Efeso, grandi pietre dalle cave di porfido egiziane, marmo verde dalla Tessaglia, pietra nera dalla regione del Bosforo e pietra gialla dalla Siria e più di diecimila persone furono impiegate nel cantiere. I terremoti del 553 e del 557 causarono delle fessurazioni che comportarono il crollo della cupola il 7 maggio 558. I lavori di ricostruzione furono affidati ad Isidoro il Giovane, il quale scelse dei materiali più leggeri dei precedenti e modificò il profilo della cupola, conferendo all'edificio la sua altezza interna attuale di 55.6 metri. Questa ricostruzione, che dette alla chiesa il suo aspetto odierno, terminò nel 562. La basilica subì in seguito altri gravi danni, prima in un grande incendio nel 859 e successivamente nel terremoto del 869, che

fece quasi collassare nuovamente la cupola. I danni provocati furono sistemati dall'imperatore bizantino Basilio II per mezzo dell'architetto armeno Trdat e la chiesa venne riaperta nel maggio 994. Nel 1346 si verificò il collasso di alcuni elementi strutturali ad est che comportarono la chiusura della struttura fino al 1354, anno in cui terminarono le riparazioni seguite dagli architetti Astras e Peralta.

- 4) Dal XV al XIX secolo d.C.: subito dopo la conquista di Costantinopoli nel 1453, Fatih Sultan Mehmet (Maometto II) convertì la Basilica in Moschea. Lo stesso ordinò la realizzazione del primo minareto, l'aggiunta del *mihrab* che indica la direzione della mecca, e l'intonacatura dei mosaici parietali. Sotto il sultanato di Selim e sotto la guida dell'architetto ottomano Mimar Sinan furono eseguiti lavori di rinforzo, vennero costruiti altri due minareti e il mausoleo del sultano. Coeva è la realizzazione della zona di rispetto (circa 24 metri di larghezza) intorno alla struttura. Uno dei più grandi e completi interventi di restauro di Santa Sofia fu quello ordinato dal sultano Abdul Mejid I, completato tra il 1847 e il 1849, sotto la direzione dell'architetto Fossati. In aggiunta al consolidamento della cupola ed al rafforzamento e raddrizzamento dei pilastri, furono inserite delle catene d'acciaio intorno alla base della cupola, i mosaici bizantini superstiti vennero scoperti e ricoperti con un nuovo strato d'intonaco ed i vecchi lampadari vennero sostituiti da nuovi. Alle colonne vennero appesi quattro medaglioni circolari (Fig. 1.5), opera del calligrafo Kazasker İzzed Effendi sui quali si stagliano ancora oggi i nomi di Allah, Maometto, dei primi quattro califfi (Abu Bakr, Umar, Uthman e Ali) e dei due nipoti Maometto: Hassan e Hussein. Il 13 luglio 1849, alla fine del restauro, la moschea venne riaperta al culto.

Dal 1934 il primo presidente turco e fondatore della Repubblica di Turchia, Mustafa Kemal Atatürk, trasformò la struttura in Museo (Necipoglu, 1992). I tappeti vennero rimossi e le decorazioni del pavimento di marmo riapparvero per la prima volta dopo secoli, mentre l'intonaco bianco che copriva molti dei mosaici fu rimosso.

Da allora sono stati condotti diversi studi e sono stati realizzati numerosi interventi di restauro, ricostruzione e consolidamento, di cui molti ancora in itinere.



Fig. 1.5. Medaglioni circolari opera del calligrafo Kazasker İzzed Effendi.

Negli anni 1997-2002 il World Monuments Fund stanziò una serie di sovvenzioni attraverso le quali venne eseguito il restauro della cupola, la stabilizzazione strutturale, la riparazione del tetto e la conservazione degli interni della cupola. Nel 2006 il progetto del WMF fu completato, anche se altre aree di Santa Sofia continuano a richiedere manutenzione.

Attualmente l'uso dell'edificio come luogo di culto (moschea o chiesa) è severamente proibito. Tuttavia, dal 2010, diverse associazioni islamiche e membri del governo turco hanno richiesto, con crescente insistenza, la riapertura di Santa Sofia al culto islamico.

1.3 Descrizione dell'Edificio

L'edificio attuale si presenta come un insieme sistematico di elementi costruttivi di notevoli dimensioni con evidenti deformazioni strutturali. Le stesse interessano gli archi, le volte, la cupola ed i colonnati e denunciano uno stato di precarietà che accompagna l'edificio da molto tempo. La nuova configurazione di equilibrio, così come le numerose manifestazioni di degrado, sono la testimonianza di un'opera di straordinario ingegno costruttivo edificata in tempi troppo ristretti e con evidenti lacune strutturali. Le varie

stratificazioni che Santa Sofia ha subito nel corso dei secoli ci hanno lasciato in eredità un edificio monumentale con un impianto planimetrico imponente (Fig. 1.6).

L'edificio, con pianta quasi quadrata di dimensioni 71x77 m, presenta tre navate, arcate divisorie in doppio ordine ed un unico abside in corrispondenza della navata centrale (Fig. 1.7).

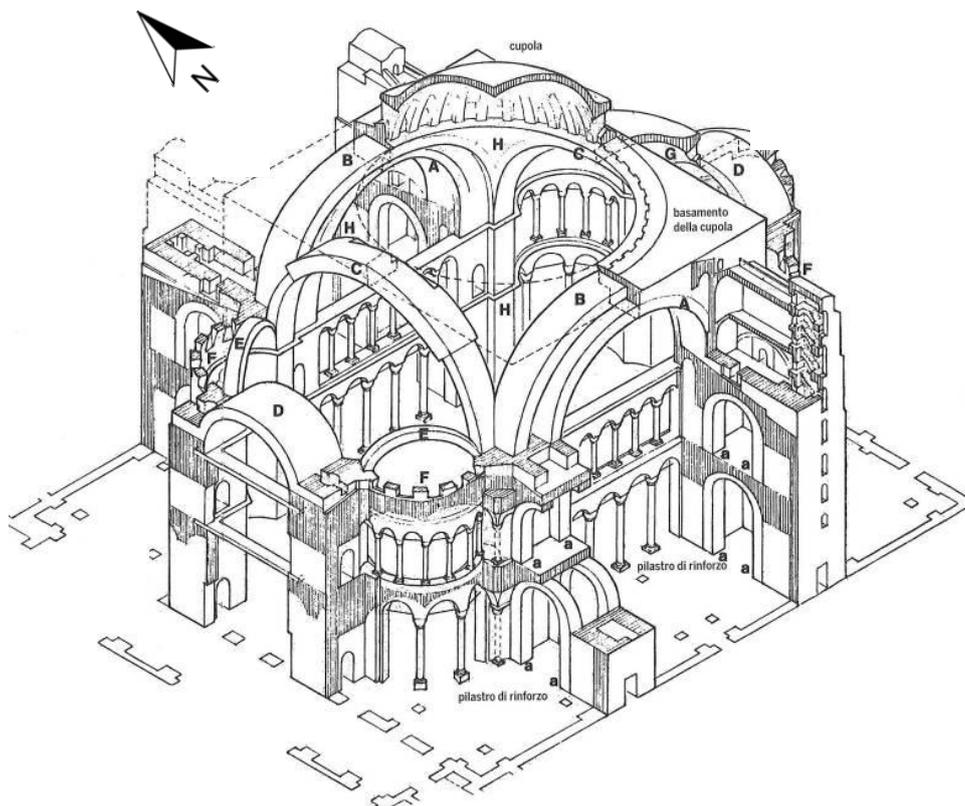


Fig. 1.6. Sistema costruttivo primario e secondario dell'edificio (da Mainstone, 2009).

L'ingresso principale (ad ovest) avveniva attraversando l'esonartece, assai stretto ed allungato, ed il narteca, costituito da un ampio vestibolo con 60 metri di lunghezza per 11 di larghezza (Fig. 1.7). Particolare è un mosaico del X sec. posto sul timpano della porta che introduce al narteca di Santa Sofia (Fig. 1.8). Il mosaico mostra la Vergine in trono con il Bambino e a destra Costantino, fondatore della città, nell'atto di offrire alla Vergine le mura con la porta d'oro e, a sinistra, Giustiniano, che offre invece il modello di Santa Sofia. Il mosaico fu fatto realizzare da Basilio II nel 989 in occasione della sua vittoria sui bulgari.

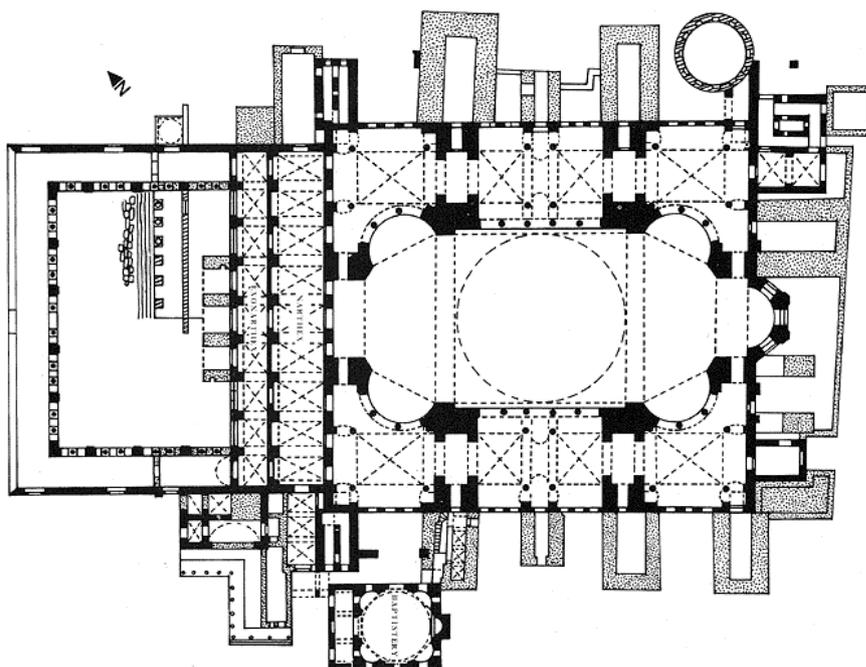


Fig. 1.7. Pianta di Santa Sofia.

Alla navata centrale si accede attraverso cinque porte, la più celebre è quella centrale: la tripla Porta Imperiale, un tempo usata solo dagli imperatori. La navata centrale, che copre uno spazio libero di circa 30 metri di larghezza per 80 metri di lunghezza, è delimitata da una serie di piloni e colonne che la separano dalle navate laterali del piano terra e dalla galleria del piano superiore. La navata centrale è coperta dalla cupola, da due semicupole (Fig. 1.6, lettera G) e da quattro esedre (Fig. 1.6, lettera F).

La cupola principale (Fig. 1.9), eretta su base rettangolare possiede un diametro massimo di 31.24 m ed un'altezza da terra di 55.6 m (Erdik e Croci, 2010). Nei quattro angoli si trovano i pennacchi (Fig. 1.6, lettera H) raffiguranti gli arcangeli (Fig. 1.9); questi rappresentano geometricamente porzioni triangolari di sfera che raccordano la base quadrata dei piloni sottostanti a quella emisferica della cupola. I pennacchi delimitano lateralmente gli archi principali (Fig. 6, lettera B) e sorreggono, assieme a questi ultimi, la cupola. Gli stessi pennacchi, assieme agli archi principali, scaricano il peso della cupola direttamente sui piloni sottostanti. Attraverso le finestre, poste alla base (in totale 40) corrono dei costoloni longitudinali (Fig. 1.9), efficaci per il sostegno della mole della cupola, più ellittica che circolare. Al di sotto del sistema di archi principali sono ubicati gli archi secondari (Fig. 1.6, lettera A). I paramenti murari posti al di sotto degli archi superiori a nord e sud costituiscono i tympana (Fig. 1.9).

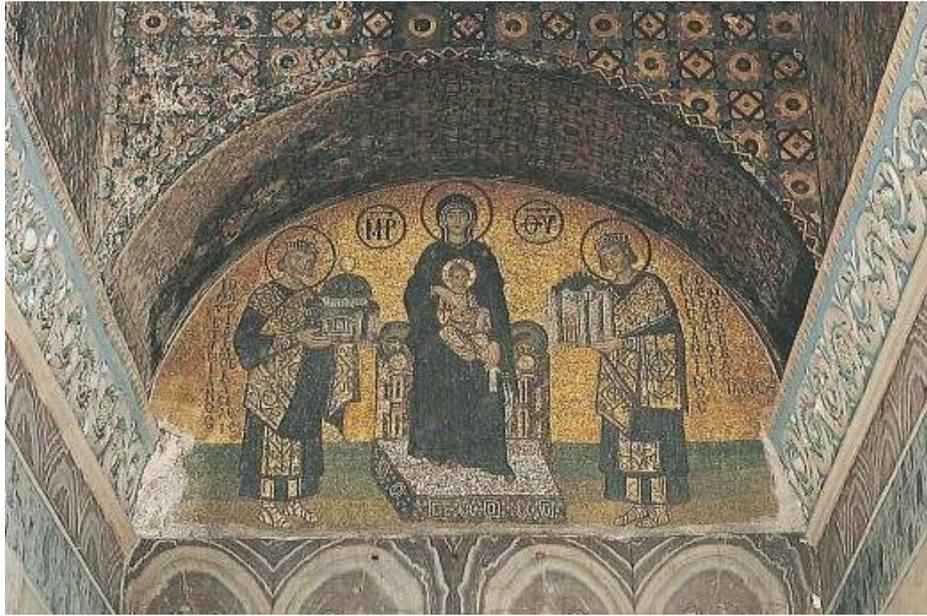


Fig. 1.8. Mosaico sovrastante la porta interna del portico di sud-ovest (da Mainstone, 2009) in cui è raffigurata la Vergine con a destra Costantino che porta in dono le mura della città e a sinistra Giustiniano che porta in dono il modello di Santa Sofia.

I principali materiali impiegati per la realizzazione della cupola, dei pennacchi, delle semicupole e dei tympana sono i mattoni. Secondo la *Narratio* di *Procopio* i mattoni usati per gli archi principali e per la cupola sono provenienti dall'isola di Rodi ed hanno uno spessore pari a 40-50 mm. Per la malta, nello stesso testo, si parla di un preparato con calce spenta, sabbia e frammenti di mattoni, posta in opera con uno spessore di 50-60 mm pertanto maggiore dello spessore dei mattoni (Mainstone, 2009).

Il basamento della cupola è costituito da blocchi di marmo sui quali è stata realizzata la calotta in mattoni. Le ricostruzioni della cupola, avvenute nel VI secolo, hanno comportato l'innalzamento della stessa di 20 piedi bizantini (pari a circa 6.24 m). Gli interventi principali che ne hanno determinato la conformazione attuale sono tutte quelle modifiche che hanno interessato la ricostruzione della cupola tra il VI secolo ed il XIV secolo.

Nel caso degli archi è importante distinguere i due sistemi presenti nella struttura: gli archi inferiori (Fig. 1.6, lettera A) che sorreggono i tympana, e quelli superiori (Fig. 1.6, lettera B) che sorreggono la cupola.



Fig. 1.9. Cupola centrale vista dal basso, con i 4 pennacchi che la sorreggono e i tympana visibili al lato nord e sud.

Gli interventi di maggiore rilievo che li hanno interessati sono:

- le ricostruzioni del VI secolo (dopo il crollo della cupola) dell'arco est e modifiche sugli archi sud e nord;
- la ricostruzione del X secolo dell'arco ovest, per resistere alla enorme spinta della semicupola venne aumentato lo spessore e l'ampiezza prima della ricostruzione della cupola. La deformazione ha comunque generato una leggera pendenza di 25 cm verso l'interno rispetto l'imposta;
- il collasso dell'arco principale est nel XIV secolo con conseguente ricostruzione.

Gli archi superiori ed inferiori nord e sud non sono mai stati ricostruiti e, diversamente da quelli ad est e ad ovest, sono simmetrici per posizione con dimensioni variabili in altezza (la larghezza degli archi secondari parte da 94 cm in corrispondenza della base dei pennacchi a 132 cm in sommità).

I tympana (Fig. 1.9), delimitati dagli archi secondari lungo i lati nord e sud della struttura, hanno subito vari interventi di ricostruzione a causa della fragilità dei due colonnati di sostegno (per i pilastri sono stati utilizzati blocchi di pietra calcarea o pietra verde -

granito - profondi circa 45 cm, alternati regolarmente con ricorsi di mattoni spessi circa 40-50 cm e strati di malta a base di calce e sabbia con polvere di mattoni con uno spessore pari a circa 50-60 cm). Difatti vennero ricostruiti per intero nel VI secolo e nel X secolo dopo che i colonnati sottostanti furono smantellati. Nel XIV secolo vennero eseguiti dei restringimenti delle aperture nel tentativo di rendere più stabile la parete muraria (le 40 finestre presenti nella base della cupola sono uguali in numero a quelle presenti nelle due semicupole e l'intervallo delle stesse risulta pari a quello delle finestre ai piedi dei tympana). Il destino delle semicupole principali è stato legato alle vicende che hanno interessato le porzioni ad est ed a ovest dell'edificio. Prima gli eventi sismici del VI secolo che hanno causato delle fessurazioni nella semicupola est, successivamente, nel X e nel XIV secolo, la ricostruzione delle semicupole principali.

La navata principale termina con la zona absidale rivolta verso est (Fig. 1.10), dove sorgeva l'altare e successivamente fu costruito il *mihrab* orientato verso la Mecca. Sul catino absidale è presente il mosaico della Vergine con bambino (Fig. 1.10 e Fig. 1.11) classificato come uno dei primi ad essere creati (venne inaugurato nel 867, nonostante pare sia una ricostruzione di quello che andò precedentemente distrutto).

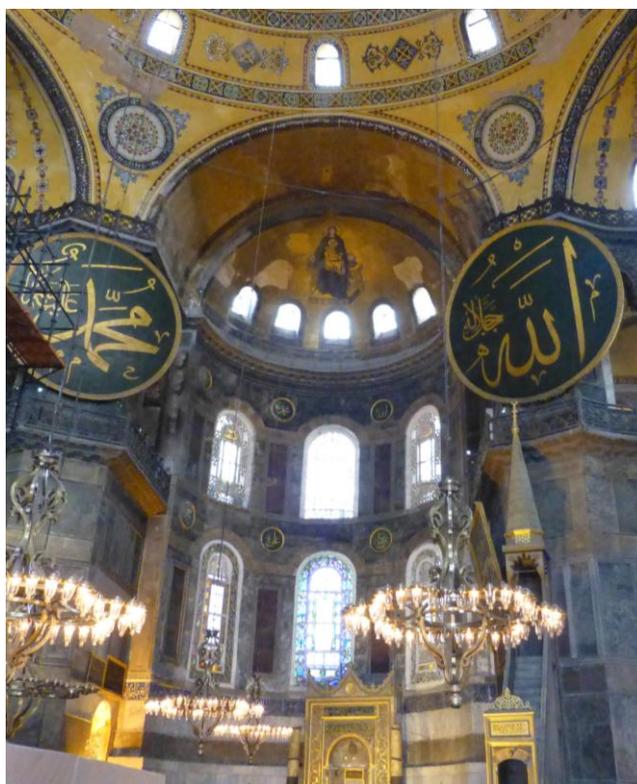


Fig. 1.10. Zona absidale di Santa Sofia.



Fig. 1.11. Particolare del mosaico raffigurante la Vergine col bambino posto nel catino absidale.

La navata centrale è fiancheggiata da due navate laterali, ripartite in tre sezioni da tre gruppi di quattro colonne (Fig. 1.7). Le navate laterali sono sormontate dalla galleria superiore (Fig. 1.12) disposta a ferro di cavallo ed arricchita con numerosi mosaici. In origine la galleria meridionale era riservata alle donne, a questa si accedeva direttamente dall'attiguo palazzo del patriarca; successivamente fu riservata ai membri della famiglia imperiale perché potessero partecipare ai riti religiosi lontano dallo sguardo della folla.

Al centro della galleria superiore vi era la Loggia dell'Imperatrice, dalla quale l'imperatrice e la sua corte potevano seguire la cerimonia che si svolgeva in basso.

La decorazione interna è notevole fin nelle parti più minute e nascoste. L'intero edificio è arricchito da marmi policromi (Krushkova et al., 2009) e mosaici risalenti al periodo bizantino (Teteriatnikov, 1998; Taddei, 2013) e, successivamente cristiano, raffiguranti il Cristo, la Vergine Maria, Santi, imperatori e imperatrici. Oltre ai mosaici, un gran numero di decorazioni figurative venne aggiunto nel corso della seconda metà del IX secolo. Grandi lastre di marmo rivestono attualmente il pavimento di Santa Sofia (Fig. 1.13), che al tempo di Giustiniano era coperto di mosaici abbinati a marmi di diverso colore.



Fig. 1.12. Navata laterale con galleria, posta nella parte superiore.

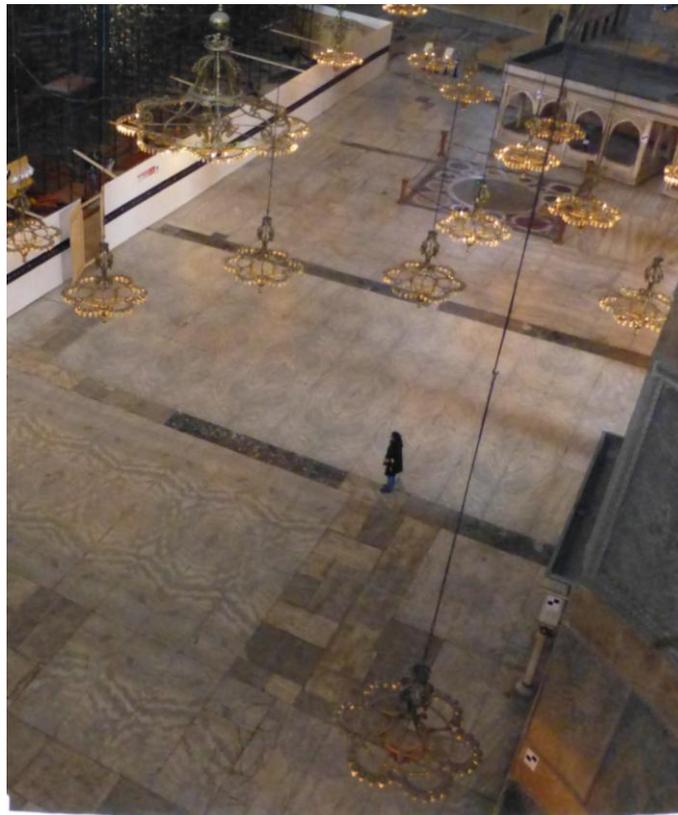


Fig. 1.13. Particolare del pavimento in marmo, navata centrale di Santa Sofia.

All'interno estremamente ricco dell'edificio, corrisponde un esterno piuttosto nudo e schematico caratterizzato da contrafforti che si trovano su tutti i lati della costruzione (Fig. 1.14). Nel VI secolo la facciata meridionale era nascosta dal palazzo del Patriarca, un vasto complesso di edifici di altezza considerevole, in quanto comunicava direttamente con la galleria della chiesa. Anche la facciata a nord era chiusa da edifici, come fanno supporre alcuni archi in rovina, e cappelle e annessi si addossavano contro il lato orientale. Sul lato occidentale, invece si trovava un atrio colonnato, di cui nel secolo scorso esistevano ancora i resti, quindi originariamente doveva esserci una scala che conduceva all'atrio. Salendola, il visitatore giungeva a un ampio cortile di circa 60 x 40 m, con una fontana centrale: questo era l'unico punto da cui si potesse avere una visione libera della facciata principale, che era rivestita di lastre di marmo del Proconneso. In seguito, per ragioni ignote, l'ingresso occidentale cadde in disuso e fu sostituito dall'attuale ingresso meridionale privo di monumentalità.



Fig. 1.14. Esterno di Santa Sofia.

1.4 Cronologia storica, delle fasi costruttive e degli interventi di restauro

286 - Diocleziano governa l'Impero Romano d'Oriente; Massimiano governa l'Impero Romano d'Occidente.

306 - Costantino il Grande diventa Imperatore d'Occidente.

311 - A Roma iniziano le persecuzioni dei Cristiani.

313 - Editto di Milano: il Cristianesimo diventa una religione riconosciuta. Costantino favorisce il Cristianesimo nella parte d'Impero da lui controllata.

324 - Costantino il Grande diventa unico Imperatore.

325 - Primo Concilio di Nicea. Viene condannata l'eresia ariana.

326 - Iniziano i lavori per la nuova capitale *Nova Roma* (Nuova Roma) sul sito dell'antica città di Bisanzio. Secondo la tradizione che vuole Costantino come fondatore, si può approssimativamente datare tra il 326 e il 337 la costruzione di una *prima basilica* presso il Palazzo Imperiale. La chiesa fu dedicata al *Logos*, la seconda persona della Santissima Trinità e consacrata dal vescovo Eusebio di Nicomedia tra il 339 e il 341.

330 - Inaugurazione di Costantinopoli: la città, ora quattro volte più grande, diventa capitale dell'Impero Romano insieme a Roma.

337 - Morte di Costantino il Grande.

350 circa - Crollo della prima basilica costantiniana, forse in seguito ad un sisma.

360 - Costanzo II ricostruisce e amplia la basilica fondata da Costantino: si tratta della cosiddetta *prima chiesa* (conosciuta come la "Grande Chiesa" fino al V sec.) che viene consacrata il 15 febbraio dal vescovo Eudossio di Antiochia. L'edificio fu progettato come una tradizionale basilica latina con colonnato e gallerie, dotata di un tetto in legno. L'ingresso era preceduto da un doppio nartece.

393 - Teodosio rende il paganesimo illegale. Il cristianesimo diventa la religione ufficiale dell'Impero Romano.

395 - Teodosio muore. L'impero romano è diviso in modo permanente in Oriente e Occidente.

402 - Ravenna, sotto l'imperatore Onorio, diventa la capitale dell'Impero Romano d'Occidente.

404 - Incendio e distruzione della prima chiesa. Il Patriarca di Costantinopoli Giovanni Crisostomo entrò in un conflitto con l'imperatrice Elia Eudossia, moglie dell'imperatore Arcadio, e per questo fu mandato in esilio il 20 giugno 404. Durante gli scontri che avvennero in seguito, la prima chiesa fu in gran parte distrutta da un incendio. Nulla di essa rimane oggi.

415 - Teodosio II (408-450) ricostruisce e inaugura la *seconda chiesa* il 10 ottobre. La basilica, dotata ancora di un tetto in legno, fu progettata dall'architetto Rufino. Diversi blocchi di marmo appartenenti all'edificio teodosiano sono stati scoperti nel 1935 sotto il cortile occidentale da A.M. Schneider; tra questi quello raffigurante 12 agnelli, i quali rappresentano metaforicamente i 12 apostoli. Originariamente parte del monumentale ingresso principale, i blocchi sono visibili in uno scavo adiacente all'ingresso dell'edificio. Ulteriori scavi sono stati abbandonati per paura di pregiudicare l'integrità della basilica.

431 - Il Concilio di Efeso condanna l'eresia nestoriana: la Vergine Maria è accettata come la Madre di Dio (*Theotokos*).

451 - Il Concilio di Calcedonia approva la doppia natura, divina e umana, del Salvatore, secondo la dottrina cristologica di Papa Leone Magno.

476 - Il re germanico Odoacre occupa Roma, causando la caduta dell'Impero Romano d'Occidente. È la fine del periodo classico della civiltà occidentale e l'inizio del Medioevo.

529 - Giustiniano, imperatore romano d'Oriente dal 527 al 565, vieta l'insegnamento pagano in tutto l'Impero Romano d'Oriente. Chiude l'Accademia platonica e altre scuole di Atene, che avevano prosperato per quasi mille anni. Da un punto di vista filosofico, il passaggio dall'età antica al Medioevo è segnato dalla data simbolica del 529.

532 - Incendio e distruzione della seconda chiesa durante la cosiddetta rivolta di "Nika", scoppiata nel gennaio del 532 contro l'imperatore Giustiniano I. Il 23 febbraio 532, pochi

giorni dopo la distruzione della seconda chiesa, l'imperatore Giustiniano I decide di costruire una nuova basilica completamente diversa, più grande e più maestosa rispetto a quelle dei suoi predecessori e ne affida il progetto all'architetto Isidoro di Mileto e al fisico e matematico Antemio di Tralle, che però muore nel 534, dopo solo un anno dall'avvio dei lavori.

533 - Giustiniano emana il *Codice Giustiniano*.

537 - L'imperatore Giustiniano, insieme al Patriarca Eutichio, inaugura la *terza chiesa* il 27 dicembre 537. La Basilica di Santa Sofia diventa la sede del Patriarca di Costantinopoli e il luogo principale per le cerimonie imperiali dei reali bizantini, come le incoronazioni.

534 - Il diritto romano viene codificato sotto Giustiniano nel *Corpus Iuris Civilis*.

542 - La peste bubbonica dimezza la popolazione di Costantinopoli: il numero delle vittime è stimato in 300.000.

553 - Un sisma causa alcune fessurazioni nella cupola centrale. Si tiene, nello stesso anno, il quinto Concilio ecumenico convocato da Giustiniano I per condannare gli scritti nestoriani chiamati i "tre capitoli".

557 - Un nuovo sisma causa altre crepe e fessurazioni nella semicupola orientale.

558 - Crollo della cupola centrale, che distrugge anche l'ambone, l'altare e il ciborio. Giustiniano affida la ricostruzione a Isidoro il Giovane, nipote di Isidoro di Mileto.

562 - Fine dei lavori di ricostruzione: la chiesa assume il suo attuale aspetto. La riconsacrazione della basilica avviene il 23 dicembre con una cerimonia presieduta dal Patriarca Eutichio.

565-578 - I mosaici all'interno della chiesa vengono completati sotto il regno dell'imperatore Giustino II.

626 - Costantinopoli subisce il suo primo assedio da parte degli Avari e dei Persiani.

678 - Fallisce un assedio musulmano di Costantinopoli. I romani orientali e gli arabi stabiliscono una tregua.

726 - Leone III Isaurico proibisce il culto delle icone e ordina all'esercito di rimuovere tutte le immagini religiose e le statue dalla basilica. Si inaugura il periodo di iconoclastia bizantina che durerà fino al 843.

717 - Assedio arabo di Costantinopoli.

797-802 - Breve tregua dell'iconoclastia sotto la co-imperatrice Irene.

800 - Carlo Magno è incoronato imperatore da Papa Leone III, in teoria una rinascita dell'impero romano in Occidente.

843 - Fine del periodo iconoclasta. Il ritorno di immagini sacre alle chiese e monasteri di Bisanzio è avvenuto dopo la morte di Teofilo, quando subentrò Teodora come reggente.

859 - La basilica subisce altri gravi danni in un grande incendio.

860 - I Vichinghi attaccano Costantinopoli (860-907). Secondo la cronaca russa primitiva, i Vichinghi, 80000 uomini e 2000 navi erano a Costantinopoli.

867 - Realizzazione del mosaico della Vergine con il Bambino.

869 - La basilica subisce altri nuovi danni in un terremoto.

869 - Terremoto in cui viene gravemente danneggiata la parte ovest della cupola.

879-880 - Consiglio in Santa Sofia.

912 - Realizzazione del mosaico di Alessandro.

984 - Ricostruzione dell'arco occidentale e parte della cupola.

986 - Realizzazione del mosaico sopra il vestibolo sud-ovest (986- 994).

989 - Terremoto che causò il crollo dell'arco ovest principale e la cupola, già lesionata dall'ultimo sisma, crollò definitivamente.

994-995 - Lavori di restauro, soprattutto di rafforzamento degli archi trasversali occidentali e delle nervature di collegamento della cupola, effettuati da un architetto armeno Tiridate.

1204 - Durante la Quarta Crociata, la chiesa fu saccheggiata e profanata dai cristiani latini.

1204-1261 - Durante l'occupazione latina di Costantinopoli la chiesa divenne una cattedrale cattolica.

1028 - Realizzazione del mosaico dell'imperatore Costantino IX.

1054 - Scisma tra la Chiesa ortodossa e la Chiesa romana, verificatosi quando il cardinale Humbert consegna una bolla di scomunica contro le Chiese orientali sull'altare di Santa Sofia.

1096 - La prima crociata cristiana contro l'Oriente.

1118 - Realizzazione del mosaico della famiglia di Giovanni Comneno.

1122 - Realizzazione del mosaico raffigurante il figlio di Giovanni Comneno Alessio.

1147 - La seconda crociata.

1166 - Sinodo in Santa Sofia

1189 - La Terza Crociata.

1204 - I crociati conquistano Costantinopoli.

1204 - Arrivo dei Crociati a Santa Sofia. La Basilica venne saccheggiata e diversi reperti furono rimossi e inviati alle chiese occidentali. Tra questi "un frammento della Vera Croce", una pietra dalla tomba di Cristo, il sudario di Cristo e le ossa di alcuni santi.

1204 - Conclusione della quarta Crociata, organizzata da Papa Innocenzo III. Costantinopoli fu conquistata e saccheggiata da un esercito composto principalmente da francesi, veneziani e altri italiani.

1261 - I Bizantini riconquistano la città. La Basilica di Santa Sofia risultava in pessimo stato.

1317 - L'imperatore Andronico II ordina la costruzione di quattro nuovi contrafforti

1344-1348 - Il terremoto del 1344 ha causato la comparsa di numerose crepe, ma il vero e proprio disastro si è verificato nel 1348, quando l'arco orientale, un terzo della cupola e diverse altre sezioni dell'edificio crollarono, distruggendo l'ambone.

1354 - Un nuovo sisma arreca danni alla struttura che dovette essere chiusa.

1397 – I Turchi assediaron Costantinopoli.

1452 - Federico III viene incoronato come il primo Asburgo del Sacro Romano Impero.

1452 - Unione della Chiesa orientale e occidentale, dichiarata durante il Consiglio, riunito a Santa Sofia, cinque mesi prima della conquista turca.

1453 - Fatih Sultan Mehmet (Maometto II) assedia Costantinopoli: anche la basilica viene saccheggiata e trasformata in moschea.

1453 - Presa di Costantinopoli da parte dei turchi ottomani e fine dell'Impero Romano d'Oriente.

1453 - La Basilica di Santa Sofia viene trasformata in Moschea.

1481 - Vengono innalzati i primi minareti.

1520 - Regno di Solimano il Magnifico.

1550 - A causa di nuovi sismi i minareti crollano e vengono ricostruiti.

1566-1577 - Durante il regno di Selim II l'edificio iniziò a mostrare segni di cedimento e si dovette provvedere a rinforzarlo.

1639 - Battistero trasformato in mausoleo

1717 - Durante il Regno Di Ahmed III viene ristrutturato l'intonaco degli interni.

1730 - Regno del sultano Mahmud (1730-1754). Sono state effettuate numerose aggiunte in stile barocco all'interno della moschea: una fontana, un Imaret (mensa), una scuola elementare, una nuova loggia per il sultano, un mihrab ed una biblioteca (1739).

1847-1849 - Avviene il restauro più famoso, ordinato dal sultano Abdul Mejid I, ad opera dell'architetto ticinese Gaspare Fossati e suo fratello minore Giuseppe. Si tratta del restauro più completo in cui fu consolidata la cupola e le volte, raddrizzate le colonne e rinnovate le decorazioni degli esterni e degli interni. I mosaici bizantini superstiti vennero scoperti e ricoperti con uno strato d'intonaco ed i vecchi lampadari vennero sostituiti da

nuovi, del tipo a goccia. Alle colonne vennero appesi quattro giganteschi medaglioni circolari, opera del calligrafo Kazasker Mustafa İzzed Effendi.

1849 - Terminano i restauri e la moschea venne riaperta in una cerimonia solenne.

1894 - Un terremoto causò notevoli danni e l'edificio rimase chiuso per molto tempo.

1894 - Prima monografia scientifica sulla Basilica di Santa Sofia scritta da WR Lethaby e H. Swainson.

1905 - H. Prost, un esperto di urbanistica, ha preso le misure dell'edificio ed ha redatto progetti architettonici.

1907 - Il Ministero delle Fondazioni ha assemblato un comitato internazionale con lo scopo di preparare una relazione sulle condizioni dell'edificio, ma i rapporti in conflitto e lo scoppio della guerra dei Balcani nel 1912, hanno messo fine al lavoro di questo Comitato.

1926 - A causa dello stato di degrado dell'edificio, gli esperti sono stati invitati a presentare nuovi rapporti e a raccomandare le precauzioni da prendere. Sono stati collocati nelle pareti delle gallerie superiori dei sensori di vetro e sono state fatte alcune riparazioni nella cupola.

1931 - Il primo presidente turco e fondatore della Repubblica di Turchia Mustafa Kemal Atatürk ha concesso il permesso di scoprire i mosaici di Santa Sofia a Thomas Whittemore, il fondatore dell'Istituto bizantino, che lavorò nella Basilica fino alla sua morte nel 1950.

1935 - Mustafa Kemal Atatürk trasforma la Basilica di Santa Sofia in Museo.

1935 - AM Schneider ha condotto uno scavo sul lato occidentale della Basilica di Santa Sofia e ha portato alla luce frammenti della seconda Basilica. Poiché la madrasa sul lato nord era sul punto di crollare, fu demolita.

1957 - 1959 - Restauro ad opera di Paul A. Underwood, dell'Istituto bizantino di America e Lawrence J. Majewski.

1959-1960 - Restauro della biblioteca

1984 - Sono stati eseguiti alcuni lavori di riparazione riguardanti la parte esterna dell'edificio. È stato inoltre scoperto il piano di un edificio bizantino che, probabilmente, costituiva una piccola cappella.

1992 - Un progetto di conservazione importante per le superfici decorate sul lato interno della cupola della Basilica di Santa Sofia, è stato effettuato dal Laboratorio centrale per il restauro e la conservazione (Istanbul), in collaborazione con un team internazionale di esperti finanziato dall'Unesco/Centro del Patrimonio culturale Mondiale.

1997-2002 - Il World Monuments Fund fissò una serie di sovvenzioni finalizzate principalmente al restauro della cupola.

2006 - Prima della visita del Papa Benedetto XVI il governo turco ha permesso l'assegnazione di una piccola stanza del complesso museale per essere utilizzata come sala di preghiera per il personale del museo.

CAPITOLO 2

METODOLOGIE DIAGNOSTICHE APPLICATE IN SITU

2.1 Laser Scanner

Il modello tridimensionale (3D) di Santa Sofia è stato realizzato attraverso l'impiego del Laser Scanner 3D (Fig. 2.1), uno strumento che consente il rilevamento di modelli tridimensionali tramite misurazioni laser, ad elevata precisione ed ad ampia portata (4 mm di errore ogni 50 metri), attraverso i quali è possibile rappresentare, con notevole accuratezza, elementi di svariate dimensioni.

La tecnologia di acquisizione Laser Scanner 3D rappresenta una delle più moderne tecniche di acquisizione dati. Mediante tale metodologia è possibile acquisire una nuvola di punti che, una volta elaborata in post processing, consente la creazione di un modello 3D dell'oggetto architettonico rilevato. Il sistema Laser Scanner tridimensionale, infatti, raccoglie, analizza ed immagazzina migliaia di punti al secondo, rendendoli fruibili in pochissimo tempo. Le applicazioni principali risiedono nella documentazione e nell'archiviazione dello stato di fatto di un qualsiasi manufatto rilevato; permettendo di effettuare diverse analisi a distanza di tempo per osservare eventuali fenomeni in evoluzione (degrado, alterazione o dissesto) oppure pianificare al meglio eventuali interventi di ricostruzione, conservazione o semplice studio di un manufatto (Leckebusch, 2001; Di Tondo e Verdiani, 2007; Bini e Verdiani, 2006).

I Laser a scansione (o 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, illumina il terreno 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 l'intensità del segnale di ritorno descrivendo la superficie dell'oggetto scansionato.

Lo strumento permette di ottenere rilievi con precisione micrometrica, di conseguenza bisogna evitare le vibrazioni causate dall'esterno. La precisione dello strumento varia al

variare della distanza e dell'angolo di incidenza del raggio ed è data dalla combinazione di tutti gli errori insiti nel sistema. Tanto più accurata deve essere la scansione, tanti più punti ravvicinati saranno sottoposti a scansione.

Per risolvere situazioni di probabili anomalie vengono applicati dei filtri che producono una media dei punti scansionati riducendo l'errore provocato da vibrazioni.

Mediante il Laser Scanner possono essere effettuate diverse tipologie di misurazione, a seconda dell'area da scansionare:

- Tempo di volo: per scansioni di oggetti grandi e distanti da 0.5 m fino a 6000 m.
- Misura alla differenza di fase: per scansioni di oggetti di medie e grandi dimensioni da 0.6 m fino a ca. 330 m.
- Triangolazione ottica: per scansioni di altissima risoluzione di oggetti di dimensioni ridotte posizionati da 0.2 m a 25 m.

Ovviamente, le specifiche di distanza possono variare in maniera molto significativa da modello a modello, il campo operativo sopra indicato è da intendersi come la gamma di distanze minime e massime tra tutti i modelli attualmente in commercio.

In fase di analisi è necessario seguire una serie di steps:

- Per prima cosa è necessaria la *messa in stazione (o in "bolla") dello strumento*: per i laser a scansione terrestre si utilizza un treppiede che non richiede necessariamente di essere messo in "bolla" perché la georeferenziazione completa può attuarsi in fase di elaborazione dei dati. Per i laser che si utilizzano in laboratorio si utilizza un piano ottico sensibile alle oscillazioni. Si passa poi all'*acquisizione dei dati* in una singola scansione. In questo modo viene prodotta una nuvola di punti, limitata dalle dimensioni della finestra di scansione dello strumento e dal fatto che una parte dell'oggetto può essere lasciata in ombra. Nel caso in cui l'oggetto non sia stato acquisito completamente è necessario eseguire altre scansioni da allineare mediante algoritmi di *surface matching* e/o mediante mire (target artificiali). Nel caso in cui si utilizzino algoritmi di *surface matching*, due scansioni adiacenti devono comprendere dei punti in comune (generalmente si ricorre ad una sovrapposizione del 30%). Ogni scansione possiede un proprio sistema di riferimento che generalmente coincide con il centro dello strumento.
- Segue poi *l'elaborazione dei dati* mediante pulitura della nuvola di punti. In questa fase si attua un filtraggio del rumore (dovuto essenzialmente alla divergenza del

fascio laser ed ai problemi di individuazione della direzione del fascio stesso) e si esegue l'eliminazione di dati spuri o legati a disturbo (vegetazione, linee elettriche, ecc.). Mediante l'*allineamento delle singole scansioni* (o registrazione delle scansioni) è possibile, successivamente, allineare ed unire le singole acquisizioni in una unica nuvola di punti secondo un determinato sistema di riferimento. Questo processo può essere eseguito mediante algoritmi di *surface matching* (in particolare l'algoritmo ICP - *Iterative Closest Point*) che allineano le parti comuni di scansioni adiacenti attraverso la minimizzazione della distanza tra esse, oppure mediante l'uso di punti di controllo materializzati attraverso target artificiali. Va sottolineato che la precisione ottenibile mediante *surface matching* è generalmente migliore di quella ottenibile mediante soli punti di controllo; il secondo tipo di registrazione è quindi generalmente limitato a quei casi in cui non sia possibile disporre di una quantità sufficiente di punti in comune tra scansioni adiacenti.

- Si passa poi alla *georeferenziazione*, attraverso una rete di appoggio topografico, generalmente basata sull'uso di GPS e/o stazione topografica totale. Nel caso in cui l'allineamento delle singole scansioni sia eseguito mediante target artificiali, la registrazione delle scansioni e la georeferenziazione possono essere attuate contemporaneamente. Le ultime fasi di elaborazione dei dati riguardano la triangolazione e costruzione della *mesh* (telaio di punti), la chiusura della *mesh* e correzione delle facce anormali, la riduzione del modello per renderlo utilizzabile in un database (decimazione), l'applicazione delle *textures* al modello 3D e l'esportazione per l'uso richiesto (*rendering*).

La strumentazione utilizzata per il rilievo di Santa Sofia (Fig. 2.1) è costituita da due scanner laser prodotti dalla Leica Geosystems, i modelli "Scan Station 2" e "Scan Station C-10" ad impulsi ad altissima velocità, con compensatore bi-assiale integrato, con una velocità di scansione massima istantanea fino a 50.000 punti/sec. e media variabile in base alla densità di scansione specifica e al campo di vista. La densità di scansione effettuata è stata non superiore a 5 mm.

La scansione mediante Laser Scanner ha interessato sia l'interno che l'esterno dell'edificio. Tale metodologia è stata utilizzata per creare la piattaforma su cui impostare il database GIS 3D e per studiare e misurare la deformazione dell'edificio.



Fig. 2.1. Laser Scanner 3D utilizzato per il rilievo di Santa Sofia.

2.2 Rilievo fotografico per mezzo di Droni

I droni UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) sono velivoli di recentissima creazione caratterizzati dall'assenza di un pilota umano a bordo. Il loro volo è controllato autonomamente da un computer di bordo, oppure da un controllo remoto gestito da un pilota a terra. Questi strumenti nascono per uso militare ma vengono utilizzati in numero sempre maggiore per applicazioni civili, come l'ispezione di aree, edifici e/o condutture. La possibilità di poter riprendere a basse quote, insieme alla qualità dei sensori fotografici, ai contenuti costi di acquisizione e di esercizio degli stessi, ha fatto sì che tali strumenti venissero scelti come tecnica di integrazione preferenziale al rilievo Laser Scanner 3D rispetto ai tradizionali sistemi di ripresa aerea.

I droni si distinguono generalmente in due grandi famiglie denominate:

- *Ad ala fissa*: droni composti da un corpo rigido ed un singolo sistema di propulsione che spinge due ali rigide. Questi strumenti possiedono una maggiore autonomia, una migliore resa aerodinamica e permettono di coprire aree maggiori in minor tempo, grazie ad una maggiore velocità ed autonomia di volo.
- *Multi rotore*: droni composti da un numero variabile di eliche (da 3 ad 8 in media) che interagiscono autonomamente sulla stabilizzazione ed il movimento dell'aeromobile, grazie ad una centralina. Il vantaggio maggiore deriva dalla capacità di stazionare ad altezze predefinite ed ispezionare superfici verticali o sub

verticali (es.: pendii molto acclivi oppure facciate ed interni di edifici), catturando immagini e video a 360°.

Per il presente lavoro è stato assemblato un apposito drone *multirotore* a 6 eliche su un telaio di F550 (Fig. 2.2) modificato dal team di “Fabbrica Italiana Droni” (www.fabbricaitalianadroni.it), con le seguenti caratteristiche:

- alleggerimento dei carrelli;
- motori potenziati (740 kV);
- eliche in ABS irrigidite;
- modalità di volo stabile;
- buzzer con allarme a 10V;
- sistema di visione Fastshark con uscita a 5.8GHz e occhiali Attitude; ricezione con *Diversity System + Booster* per potenziare la trasmissione in tempo reale del segnale foto/video all’operatore;
- sistema di trasmissione potenziato a 1500 milliwatt alimentato da batteria autonoma;
- radiocomando di controllo: Futaba “T8J”.



Fig. 2.2. Drone esarotore impiegato per i rilievi di Santa Sofia.

Per le riprese foto/video è stata utilizzata una fotocamera serie GoPro “Hero 3 Black Edition” da 12 MPixel e 1080p x 60 frame/secondo, montata su un braccio robotico stabilizzato della serie Gimbal “Brushless” a 2 assi, attraverso la quale sono state effettuate in totale 352 foto e 5h e 30' di riprese. La massima visibilità raggiunta è pari a 2800 metri, mentre l'altezza massima raggiunta è pari a 103 metri.

Considerando che doveva volare su una piccola zona pianeggiante posta su una altura che si affaccia sullo Stretto del Bosforo, dove si trova Santa Sofia, il drone è stato progettato con motori ed eliche più grandi per meglio resistere alle raffiche di vento che di sovente si imbattono sulla zona.

Il rilievo è stato effettuato nel periodo 5-8 luglio 2014 ed ha avuto lo scopo di riprendere l'esterno di Santa Sofia ed, in particolare, le zone che non era stato possibile acquisire con le scansioni 3D effettuate durante le precedenti missioni. Tali scansioni, infatti, erano state realizzare esclusivamente da terra ed avevano lasciato scoperte tutte le zone esterne all'edificio sprovviste di impalcature (principalmente le cupole, le facciate al di sopra di una certa altezza ed i minareti).

Dopo aver individuato le “zone d'ombra” si è provveduto ad effettuare dei sorvoli mirati con l'ausilio di tecnici specializzati che hanno personalizzato gli scatti fotografici ed i video nelle zone ritenute utili a confermare e/o chiarire ipotesi di lavoro derivanti dagli studi effettuati fino a quel momento con laser scanner, georadar e termografia.

In particolare, ci si è concentrati sulla verifica esterna della copertura della cupola e sulla ricerca di eventuali fenomeni di degrado che causerebbero infiltrazioni di acqua non visibili dall'interno. L'acquisizione di fotografie aeree esterne ha permesso, inoltre, una migliore ubicazione su cartografia dei campioni prelevati all'esterno.

Prima della realizzazione del volo del drone sono state attentamente analizzate le condizioni meteo della città di Istanbul ed in particolare quelle di piazza Sultan Ahmet, sede di Santa Sofia, per evitare incidenti durante le riprese.

I dati dei voli realizzati sono i seguenti:

- Volo più lungo: 14' 24";
- Volo più breve: 2' 18";
- Vento max contro: 26 km/h con raffiche a 30 km/h;
- Vento minimo: 14 km/h.

2.3 Georadar (Ground Penetrating Radar - GPR)

Il metodo GPR si basa sulla trasmissione di impulsi elettromagnetici (radar) ad alta frequenza nel terreno e sulla misura del tempo trascorso tra la trasmissione e la ricezione in superficie degli impulsi stessi (Conyers e Goodman, 2007).

Attraverso un'antenna trasmittente, disposta sulla superficie del terreno, si immette un impulso di energia radar. L'onda elettromagnetica si propaga, così, verso il basso nel terreno e, quando incontra una superficie di discontinuità, parte di essa viene riflessa (torna indietro verso la superficie) e parte trasmessa.

La penetrazione delle onde GPR dipende dalla frequenza delle onde che si propagano nel terreno e dalle caratteristiche fisiche del materiale attraverso cui esse viaggiano. Le proprietà fisiche che influenzano le onde elettromagnetiche che attraversano un mezzo sono la conduttività elettrica e la permeabilità magnetica del mezzo stesso (Annan et al., 1975). Le riflessioni sono, quindi, causate generalmente da variazioni delle proprietà elettriche del terreno, variazioni di contenuto d'acqua, cambiamenti litologici o variazioni di densità di volume all'interfaccia stratigrafica. Le riflessioni possono anche essere generate all'interfaccia tra l'oggetto archeologico e il terreno circostante. Spazi vuoti nel terreno, come quelli che si possono incontrare nelle sepolture, tombe, tunnel ecc., generano riflessioni significative dovute al cambiamento di velocità dell'onda radar (Conyers e Goodman, 2007).

La profondità a cui l'energia radar può penetrare e la definizione che ci si può aspettare nel sottosuolo sono parzialmente controllati dalla frequenza dell'energia radar trasmessa. Da questa dipendono anche la lunghezza d'onda e l'attenuazione dell'onda che si propaga nel terreno.

La banda di frequenza delle antenne normalmente utilizzate varia da circa 10 MHz a circa 1000 MHz. Alcuni fattori importanti che devono essere considerati nella scelta dell'antenna sono (Conyers e Goodman, 2007):

- proprietà elettriche e magnetiche del sito in cui verranno effettuati i rilievi;
- profondità di indagine;
- dimensioni dell'oggetto archeologico che deve essere individuato;
- presenza di possibile interferenza elettrica esterna della stessa lunghezza d'onda delle onde radar che si propagano nel terreno.

Le antenne radar sono generalmente alloggiare su una slitta di legno o fibra di vetro che viene adagiata sulla superficie del terreno o appoggiata su ruote a pochi centimetri dalla superficie.

Quando viene usata una sola antenna sia come trasmittente che ricevente, essa trasmette l'impulso radar e subito dopo si pone in ricezione per captare l'energia riflessa da un eventuale bersaglio (in questo caso si parla di *acquisizione in monostatico*). Quando vengono utilizzate due antenne, una come antenna trasmittente e l'altra come antenna ricevente si parla, invece, di *acquisizione in bistatico* (Conyers e Goodman, 2007).

Le antenne sono generalmente trascinate a mano lungo un profilo ad una velocità media di circa 2 Km/h, o possono essere agganciate dietro un veicolo e trascinate ad una velocità media di circa 10 Km/h o più alta.

Esistono diversi metodi di acquisizione dei punti, in base a come si muove l'antenna sulla superficie del terreno. In uno di questi metodi l'antenna (o le antenne) viene mossa in modo continuo lungo la superficie del terreno mentre l'energia radar è costantemente trasmessa nel sottosuolo ad un ritmo fissato che dipende dal tipo di strumentazione. Il numero di dati per metro che possono essere acquisiti lungo il profilo dipende dalla velocità di trascinamento delle antenne (Conyers e Goodman, 2007).

Le antenne possono anche essere mosse per punti. Questo tipo di acquisizione permette di raccogliere i dati solo in determinati punti, ugualmente spazati, sulla superficie del terreno. Un altro metodo di acquisizione dati permette all'operatore di raccogliere questi ultimi a distanze preventivamente programmate (ad esempio ogni 5 cm) lungo un tracciato, mentre le antenne vengono mosse in modo continuo. In questo caso le distanze sono controllate da una ruota calibratrice posta sulle antenne (Conyers e Goodman, 2007).

Un metodo molto efficiente per la "mappatura" radar del sottosuolo è quello di disegnare una griglia sull'area del rilievo e di acquisire i dati lungo i profili di tale griglia (Doolittle e Miller, 1991). Generalmente sono progettate griglie rettangolari con linee spaziate di un metro o meno ma, quando le condizioni topografiche ed altri tipi di ostacoli sulla superficie del terreno lo richiedono, possono essere progettati altri tipi di griglie.

È possibile, infatti, realizzare rilievi lungo linee che si irradiano da un area centrale, per esempio, per cercare di identificare un fossato intorno ad una probabile struttura centrale fortificata (Bevan, 1977), oppure può essere utilizzato un modello di griglia romboidale

usato, ad esempio, con successo nello studio di una piantagione di canna da zucchero (Conyers 1995), dove le antenne sono state trascinate tra le piante allineate.

Le antenne radar mobili sono connesse all'unità di controllo da un cavo. I più vecchi sistemi GPR, ai quali mancava la capacità di digitalizzare direttamente sul campo il segnale originato dalle riflessioni, registravano i dati su nastro magnetico o su carta (Batey, 1987; Fisher et al., 1980; Loker, 1983). In questo caso, però, potevano essere effettuate sui dati solo poche elaborazioni (Milligan e Atkin, 1993).

Nei primi anni '80 le unità GPR hanno iniziato a registrare i dati in forma digitale (Geophysical Survey Systems, Inc. 1987). Uno dei vantaggi dei dati registrati digitalmente è che essi possono essere trattati, filtrati e visualizzati immediatamente "in tempo reale" durante l'acquisizione e sono anche più facilmente elaborabili quando vengono trasferiti ad un personal computer.

I dati relativi alle riflessioni (il tempo doppio di viaggio e l'ampiezza delle onde radar riflesse) ricevute dall'antenna, sono convertiti in segnali elettrici che si manifestano come piccole variazioni di tensione. Questi segnali sono trasmessi all'unità di controllo, amplificati e registrati, per l'immediata visualizzazione o il successivo trattamento post acquisizione.

Durante l'acquisizione dei dati, il processo di trasmissione di impulsi radar è ripetuto più volte a seconda di come le antenne sono trascinate (o mosse per punti) lungo la superficie del terreno. La visualizzazione di tutte le tracce riflesse fornisce una rappresentazione delle principali superfici riflettenti del sottosuolo. In questo modo vengono creati dei profili bidimensionali (chiamati radargrammi), che approssimano sezioni verticali, lungo ogni linea della griglia.

Le riflessioni radar sono sempre registrate in "*two-way time*" (tempo doppio di viaggio) che è il tempo impiegato da un'onda radar per viaggiare nel terreno partendo dalla superficie dell'antenna trasmittente fino ad arrivare al bersaglio (dove viene riflessa) e tornare indietro sulla superficie all'antenna ricevente. I tempi di viaggio possono essere convertiti in profondità se la velocità dell'onda radar nel mezzo attraversato è conosciuta (Conyers e Goodman, 2007). La velocità dell'onda radar, che si propaga nel terreno, dipende da un certo numero di fattori, tra cui il più importante è legato alle proprietà elettriche del materiale attraversato (Olhoeft, 1981).

L'obiettivo principale di molti rilievi GPR in archeologia è quello di differenziare le interfacce nel sottosuolo. Tutti gli strati sedimentari nel terreno hanno particolari proprietà elettriche e magnetiche che influenzano la velocità di propagazione dell'energia elettromagnetica e la sua dissipazione nel terreno. Più grande è il contrasto di queste proprietà tra due materiali sepolti, più forte è il segnale riflesso (Sellman et al., 1983). Le più forti riflessioni radar nel terreno si verificano generalmente all'interfaccia tra due spessi strati con proprietà elettriche molto differenti. Riflessioni di ampiezza più piccola si verificano generalmente quando sono presenti solo piccole differenze nelle proprietà elettriche tra gli strati. Per essere identificate come riflessioni, le interfacce importanti del sottosuolo, non solo devono separare strati con sufficiente contrasto elettrico, ma devono anche essere collocate a profondità tali che l'onda abbia energia sufficiente per essere riflessa indietro alla superficie. Man mano che l'energia radar si propaga a profondità crescenti il segnale diventa più debole ed è disperso, quindi l'energia utilizzabile per la riflessione diventa sempre più bassa e le onde registrate hanno di conseguenza un'ampiezza minore. Per ogni sito, la massima profondità di penetrazione varia con il tipo di condizioni geologiche ed il tipo di antenna usato. Il filtraggio dei dati e altre tecniche di amplificazione possono qualche volta essere applicate nel trattamento post acquisizione per migliorare la visualizzazione delle riflessioni di ampiezza molto bassa provenienti dai punti più profondi nel sottosuolo.

I modelli sintetici bidimensionali generati al computer possono essere un valido aiuto per l'individuazione delle diverse strutture sepolte. I programmi per la costruzione di modelli sintetici sono una delle innovazioni nella tecnologia GPR con ampie applicazioni in archeologia. Essi non solo possono predire se le strutture di interesse archeologico genereranno riflessioni visibili, ma possono essere adattati a condizioni geologiche variabili e al tipo di equipaggiamento radar (Conyers e Goodman, 2007)..

Come parte dell'indagine diagnostica a Santa Sofia sono state effettuate delle indagini Georadar (Fig. 2.3) per valutare l'omogeneità del sottosuolo e cercare di capire se la presenza di eventuali strutture sottostanti e/o disomogeneità del suolo potessero essere la causa di alcune distorsioni evidenti ad occhio nudo e dallo studio dei rilievi 3D.

Indagini georadar effettuate all'interno degli edifici storici hanno, infatti, dimostrato di essere utili per la diagnostica e la conservazione delle strutture e per la comprensione dei

resti di strutture conservate sotto terra (es. Barba et al., in press.; Barilaro et al., 2007; Leckebusch, 2000; Leucci, 2006; Pérez-Gràcia et al., 2000).

L'indagine diagnostica mediante georadar è stata condotta dal team interdisciplinare dell'Università della Calabria e dell' UNAM (Messico). In particolare, a Santa Sofia, sono state eseguite indagini radar di quasi tutta la pavimentazione del piano terra del monumento per verificare la presenza di eventuali strutture presenti al di sotto. È stato inoltre condotto lo studio della pavimentazione della galleria superiore per verificare la presenza di eventuali disomogeneità che potessero spiegare le fratture presenti nelle lastre marmoree della galleria (Crisci et al. 2013).

Lo studio è stato condotto con un georadar SIR 3000 della GSSI con un'antenna da 400 MHz (Fig. 2.3) ed una da 900 MHz. L'antenna a 400 MHz è stata già utilizzata con successo per lo studio dei resti sepolti in contesti urbani (Barba e Ortiz, 2001; Barba, 2003), soprattutto nelle strade ed è stata impiegata per lo studio della pavimentazione del piano terra, mentre l'antenna da 900 MHz è stata utilizzata per lo studio della pavimentazione del piano superiore.



Fig. 2.3. Strumentazione GPR utilizzata per le indagini georadar a Santa Sofia.

2.4 Termografia IR

L'indagine termografica rappresenta una tecnica diagnostica per immagini sviluppatasi in concomitanza con l'evoluzione tecnologica digitale del XXI secolo. Lo sviluppo di strumentazioni ad elevata sensibilità termica (nella strumentazione raffreddata tale sensibilità può arrivare a 0.02 °C) consente oggi di ispezionare, anche a grande distanza, superfici molto estese.

La termografia si basa sul fenomeno dell'emissione di radiazione infrarossa da parte di oggetti. Tutti gli oggetti che si trovano ad una temperatura superiore allo zero assoluto (pari a 273.15 K), infatti, emettono radiazioni infrarosse nello spazio circostante. Tali radiazioni non sono visibili all'uomo ma sono percepite come calore sulla pelle grazie alle terminazioni nervose.

La scoperta dell'infrarosso (IR) come radiazione non visibile, che porta associata una potenza radiante, risale al 1800 ad opera di Herschel. A metà del secolo scorso, con lo sviluppo dei bolometri, l'infrarosso inizia ad essere utilizzato nell'astronomia per l'analisi della radiazione stellare, ma è solo in tempi più recenti (soprattutto nel dopoguerra) che si registra un notevole sviluppo dell'infrarosso termico (Iuoni, 2004).

La termografia è una tecnica non distruttiva che permette di rilevare il flusso radiante proveniente dall'oggetto in esame, senza entrare in diretto contatto con esso (Ludwing, 2002). Le tecniche di ispezione termografica si distinguono in *passive* e *attive*. Nel primo caso la misura riguarda la temperatura emessa dai corpi considerati come sistemi isolati rispetto all'ambiente circostante. La termografia passiva rileva, quindi, la radiazione emessa dal corpo senza che questo venga sottoposto ad alcuna stimolazione esterna. Nel caso della termografia attiva, invece, si prende in considerazione la temperatura raggiunta dal corpo per effetto di un riscaldamento esterno della superficie, in genere dovuto al sole o a lampade e termoconvettori (Ludwing, 2002).

Per la misura della radiazione infrarossa, tradizionalmente, vengono impiegati sistemi di misura della temperatura "a termoelementi". Tuttavia, essi hanno l'inconveniente di effettuare una misura per punti e quindi di non fornire un quadro generale della situazione. Inoltre, alterano i valori della misura della radiazione poiché sottraggono calore all'oggetto misurato quando la sonda viene messa a contatto con quest'ultimo. Questi inconvenienti possono essere eliminati impiegando sistemi per la rilevazione della temperatura detti "termografici". Questi sistemi permettono di avere un'immagine completa delle condizioni

di temperatura esistenti sulla superficie dell'oggetto analizzato senza venire a contatto con esso.

La radiazione infrarossa emessa dall'oggetto in esame viene trasformata in segnale elettrico mediante appositi sensori. Un processore video, a sua volta, trasforma questo segnale in un'immagine termica sequenziale (termogramma) bianco/nera dove sono presenti 256 gradazioni di grigio corrispondenti a circa 256 gradazioni di temperatura. Poiché l'occhio umano riesce ad analizzare meglio la diversità di colori rispetto alla diversità di grigi, il termogramma in bianco e nero viene trasformato, grazie ad idonei supporti informatici, in un corrispondente termogramma a colori. Alle diverse zone di grigio vengono, dunque, associati dei colori in modo che alla temperatura più bassa corrisponda il nero, mentre i valori di temperatura crescenti vengono indicati con i colori blu, verde e rosso.

La tecnica termografica, nata per fini militari, è stata successivamente utilizzata in edilizia e quindi applicata anche ai beni culturali. Nel campo dell'edilizia, ad esempio, la termografia si rivela uno strumento molto utile per l'individuazione di dispersioni di calore, di ponti termici, presenza di umidità, distacchi e rifacimenti (Ludwing, 2002).

L'utilizzo della termografia nell'ambito dei beni culturali, invece, è rivolto sia allo studio del manufatto architettonico in quanto tale, attraverso l'identificazione e la documentazione grafica di elementi non riscontrabili per mezzo dell'esame a vista (Mannara, 1990), sia alla diagnostica e al monitoraggio non distruttivo degli oggetti con particolare riferimento al loro stato di conservazione. Le prime esperienze nel settore dei beni culturali sono state finalizzate prevalentemente l'individuazione di infiltrazioni di umidità, distacchi e presenza di cavità. Altre applicazioni invece hanno riguardato l'individuazione di anomalie costruttive, la verifica dello stato di conservazione e la valutazione dei vari materiali a seguito di interventi di restauro (Avdelidis e Moropoulou, 2004; Avdelidis et al., 2004; Meola et al., 2007; Kordatos et al., 2013).

Nelle ricerche effettuate a Santa Sofia, le indagini termografiche sono state eseguite con l'ausilio di una termocamera dotata di un microbolometro non raffreddato, modello SC640, prodotta dalla Flir Systems AB, modello "SC640" (Fig. 2.4), dotata di lente da 24° con zoom elettronico di 8x. La termocamera possiede una risoluzione IR di 640x480, una sensibilità termica di 30 mK a 30 °C con una frequenza di immagine di 30 Hz. Il campo di vista è di 24°x18° (FOV) con una distanza minima di messa a fuoco pari a 0.3 m. La

distanza massima dipende dalle differenze di temperatura tra l'oggetto e l'ambiente circostante; nel caso di Santa Sofia la distanza massima, tra la strumentazione e l'oggetto, si è protratta anche oltre i 25 metri. La precisione della strumentazione è contenuta tra ± 1 °C o $\pm 1\%$ in un intervallo di temperatura fino a 120°C e possiede un campo spettrale compreso tra 7.5 e 13 μm . La stessa strumentazione presenta inoltre una fotocamera digitale incorporata, dalla risoluzione di 3.2 Megapixel, ed è dotata di uno slot per scheda di memoria SD sulla quale sono state memorizzate le immagini termografiche (radiometriche), le immagini digitali equivalenti ed i video termici.



Fig. 2.4. Termocamera IR Flir Systems AB “SC640” utilizzata per le indagini a Santa Sofia.

Il software utilizzato per l'elaborazione delle immagini termografiche è il ThermaCAM Researcher Pro 2.10 prodotto dalla Flir Systems AB.

Per l'esecuzione delle indagini termografiche è stato applicato il seguente protocollo:

- individuazione preliminare dei punti di stazione;
- misurazione delle condizioni ambientali (parametri di temperatura, umidità relativa e distanze dagli oggetti);
- calibrazione della termocamera, inserimento dei parametri ambientali ed individuazione del parametro di emissività;
- individuazione delle aree da sottoporre ad ispezione ed acquisizione delle immagini termografiche e delle immagini digitali corrispondenti;

- post-processig dei dati, analisi dei termogrammi e mosaicatura delle immagini termiche.

Durante tutta la fase di lavoro è stato utilizzato il procedimento passivo, pertanto non sono state utilizzate fonti di calore a supporto delle rilevazioni termografiche.

Per le misurazioni termo igrometriche ambientali è stato utilizzato un rilevatore prodotto dalla Trotec GmbH & Co. modello 250 che integra un misuratore di temperatura ed umidità ambientale ad un pirometro laser incorporato.

Le indagini a Santa Sofia sono state effettuate in diverse zone dell'edificio, al fine di identificare aree con presenza di umidità, infiltrazioni di acqua e distacchi. Sono state analizzate, quindi, le lastre marmoree utilizzate come rivestimento dei muri di Santa Sofia per indagare il distacco ed è stato effettuato lo studio della cupola per discriminare le varie fasi costruttive mediante l'analisi delle tessiture murarie presenti al di sotto degli intonaci.

2.5 Endoscopia

L'endoscopia è un metodo di indagine, non distruttivo, che permette di visualizzare l'interno di un oggetto, consentendo di raggiungere parti nascoste o difficilmente accessibili e visionarne lo stato (Lorusso e Schippa, 2001). L'indagine viene eseguita attraverso un endoscopio, dotato di un cavo flessibile, al cui punto terminale è presente una microcamera a fibra ottica che permette l'acquisizione di immagini e video.

Questa tipologia di indagine si basa sull'acquisizione di un'immagine (reale o virtuale) e sulla successiva analisi al fine di individuare eventuali elementi utili alla formulazione di una diagnosi sullo stato di conservazione di un dato manufatto.

L'endoscopia impiega una strumentazione ottica ed elettronica (endoscopio) dedicata per due distinte esigenze: da un lato per migliorare il dettaglio e la risoluzione dell'immagine, dall'altro per rendere visibile a distanza l'immagine stessa (Caneva, 2002).

Un endoscopio è assimilabile ad un normale microscopio a riflessione. Questo, infatti, è costituito da un obiettivo, da un conduttore di immagini formato da un fascio di fibre ottiche, da un oculare per ottenere un'immagine virtuale per l'osservazione diretta, da un oculare di proiezione con camera fotografica per la registrazione dell'immagine e da una sorgente luminosa che viene inviata attraverso l'obiettivo sull'area da esaminare.

Il conduttore ottico può essere rigido, flessibile o semirigido a seconda delle diverse esigenze di impiego e può avere diverse dimensioni, sia in lunghezza che in diametro.

Altre variabili degli endoscopi sono rappresentate dall'angolo di apertura dell'ottica impiegata, che determina il campo visivo, e dall'angolo di visione (Caneva, 2002).

Gli endoscopi in genere sono costruiti in acciaio inossidabile, possono essere impermeabili e resistenti al calore (fino a 85 °C) e possono essere forniti di una testa orientabile mediante telecomando.

Una componente fondamentale dell'endoscopio è la sorgente di illuminazione che può essere a luce fredda, alogena o a luce di Wood (ultravioletta). Recentemente si stanno affermando sul mercato i videoendoscopi, costituiti da una microtelecamera a stato solido (con sensori CCD) di dimensioni estremamente ridotte (fino a 2÷3 mm di diametro), collegata attraverso un cavo ad un acquirente-condizionatore di segnali e ad un monitor televisivo. Con tale sistema si superano talune limitazioni insite nel sistema ottico (Caneva, 2002).



Fig. 2.5. Fibroscopio Moritex "Light Scope".

Gli endoscopi costituiscono importanti strumenti di osservazione e di indagine in vari settori, da quello medicale a quello industriale e civile. Nel campo dei beni culturali e in ambito archeologico, l'endoscopia viene largamente utilizzata per lo studio e l'ispezione

dell'interno di statue, murature, tombe, e in generale di ambienti e superfici di difficile accesso.

Le indagini endoscopiche su Santa Sofia hanno riguardato sostanzialmente i distacchi delle lastre marmoree dei muri del narcece e di una navata laterale. Per le prove è stato utilizzato un fibroscopio portatile (Fig. 2.5) prodotto dalla Moritex Corporation, modello "Light Scope" a fibra ottica con sonda dal diametro di 5 mm e dalla lunghezza di 3 m.

L'apparecchiatura utilizzata è dotata di un adattatore universale, modello "MDA-M1" in alluminio, per il collegamento della macchina di acquisizione foto e video. La macchina per l'acquisizione utilizzata è una Reflex digitale ad elevata risoluzione prodotta dalla Nikon, modello "D40", con ottica Nikon DX "18-55".

CAPITOLO 3

CAMPIONAMENTO E CENNI SULLE MALTE

3.1 Campionamento dell'edificio

L'indagine a Santa Sofia effettuata nel presente lavoro, oltre a prevedere una parte diagnostica eseguita direttamente sul campo (vedi capitolo 2), ha visto l'utilizzo di una serie di metodologie diagnostiche eseguite presso i laboratori del Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra (DiBEST) dell'Università della Calabria.

Per effettuare tali metodologie è stata necessaria una fase di campionamento (Fig. 3.1), con lo scopo di prelevare il materiale necessario per poter, successivamente, eseguire su di esso le indagini diagnostiche in laboratorio. Il prelievo dei campioni prevede delle regole ben precise: il campione prelevato deve essere rappresentativo, vale a dire, deve riassumere in sé le problematiche relative ad una zona omogenea e la sua composizione deve rispecchiare completamente quella dell'insieme da cui è stata estratta (Raccomandazione Normal 3/80). Inoltre, la tecnica di campionamento più appropriata e la dimensione del campione devono essere scelte in base al materiale, allo stato di conservazione, al tipo ed al numero di analisi che devono essere effettuate sul campione.



Fig. 3.1. Esempio di campionamento delle malte di allettamento, effettuato a Santa Sofia.

Nel presente lavoro di tesi sono stati prelevati in totale 20 campioni di malta di allettamento (Tab. 3.1). Trattandosi di materiali piuttosto coerenti, il prelievo è stato effettuato mediante rimozione meccanica tramite scalpello e martello.

Il campionamento ha interessato diverse parti dell'edificio e ha riguardato principalmente la parte esterna, in particolare il prospetto nord (Fig. 3.2), il prospetto nord-ovest (Fig. 3.3), il prospetto ovest (Fig. 3.4) ed il prospetto sud (Fig. 3.5).



Fig. 3.2. Campioni prelevati dal prospetto nord, riportati nella schermata del GIS 3D.

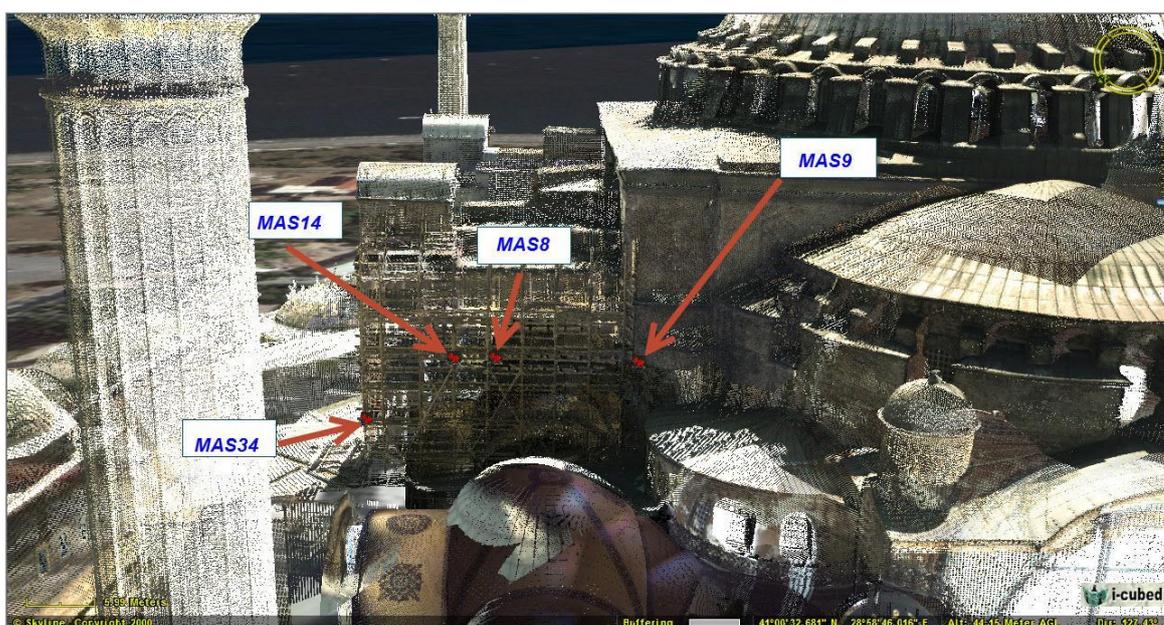


Fig. 3.3. Campioni prelevati dal prospetto nord-ovest, riportati nella schermata del GIS 3D.

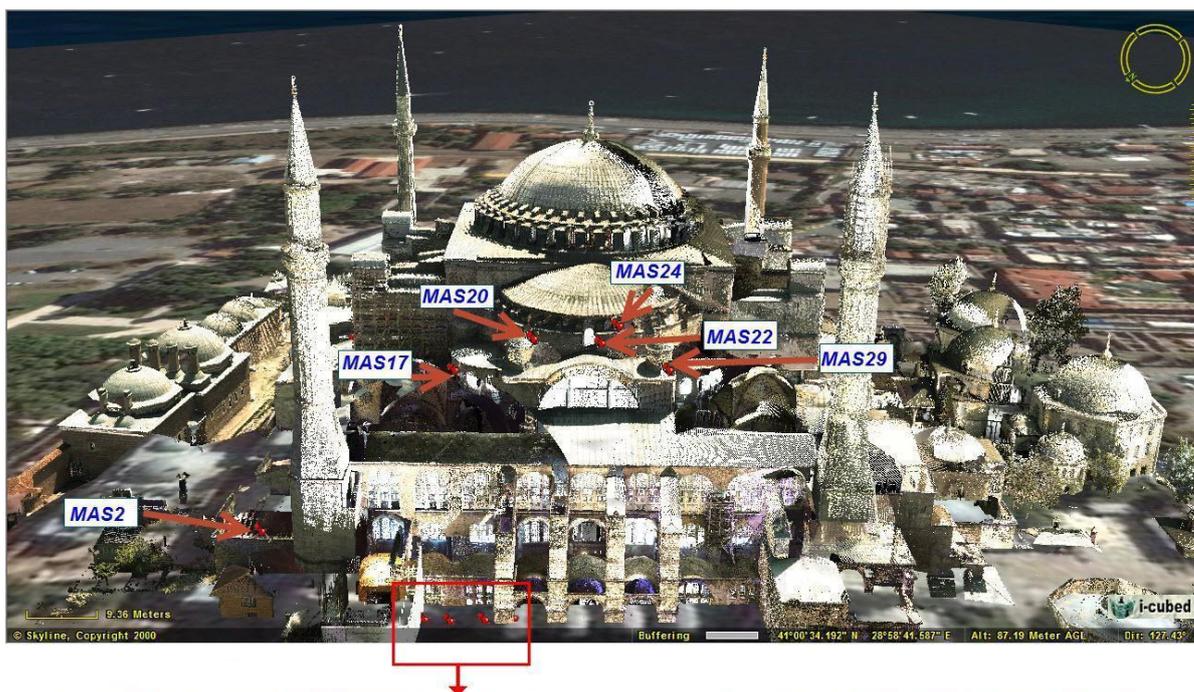


Fig. 3.4. Campioni prelevati dal prospetto ovest (ingresso principale) riportati nella schermata del GIS 3D. Nell'immagine sottostante sono riportati i campioni di malta prelevati nei resti della seconda Santa Sofia (MAS50-MAS47) e nei cunicoli sotterranei (MAS54).

Attraverso studi di tipo storico-architettonico (Mainstone, 2009), ad ogni campione è stata associata una probabile datazione (Tab. 3.1).

SIGLA	TIPOLOGIA	LOCALIZZAZIONE	PROBABILE DATAZIONE
MAS_2	Malta di allettamento	Lato nord	VI secolo
MAS_8	Malta di allettamento	Contrafforte, lato nord ovest	X secolo
MAS_9	Malta di allettamento	Parete esterna, pennacchio, lato nord ovest	X secolo (?)
MAS_14	Malta di allettamento	Contrafforte, lato nord ovest	X secolo
MAS_17	Malta di allettamento	Semicupola piccola, lato nord ovest	VI secolo
MAS_20	Malta di allettamento	Semicupola grande, lato ovest (nartece)	VI secolo
MAS_22	Malta di allettamento	Tamburo, cupoletta lato ovest parte nord	VI secolo
MAS_24	Malta di allettamento	Rinforzo semicupola grande, lato ovest (nartece)	VI secolo
MAS_29	Malta di allettamento	Tamburo cupoletta lato ovest parte sud	VI secolo
MAS_33	Malta di allettamento	Contrafforte, lato nord parte ovest	VI secolo
MAS_34	Malta di allettamento	Contrafforte, lato nord parte ovest	VI secolo
MAS_38	Malta di allettamento	Intradosso arco nord verso est	VI secolo
MAS_42	Malta di allettamento	Tympana sud lato esterno	X secolo
MAS_44	Malta di allettamento	Intradosso arco nord, verso ovest	VI secolo
MAS_47	Malta di allettamento	Paramento murario di base, lato ovest	IV secolo (?)
MAS_48	Malta di allettamento	Paramento murario di base lato ovest	IV secolo (?)
MAS_49	Malta di allettamento	Paramento murario di base lato ovest	IV secolo (?)
MAS_50	Malta di allettamento	Paramento murario di base lato ovest	IV secolo (?)
MAS_54	Malta di allettamento	Cripte piano interrato	IV secolo (?)
MAS_56	Malta di allettamento	Contrafforte scala lato sud, verso ovest	X-XIV secolo (?)

Tab. 3.1. Elenco dei campioni di malta di allettamento prelevati all'esterno dell'edificio di Santa Sofia con relativa tipologia, localizzazione e probabile datazione derivante da studi di tipo storico-architettonico (Mainstone, 2009).

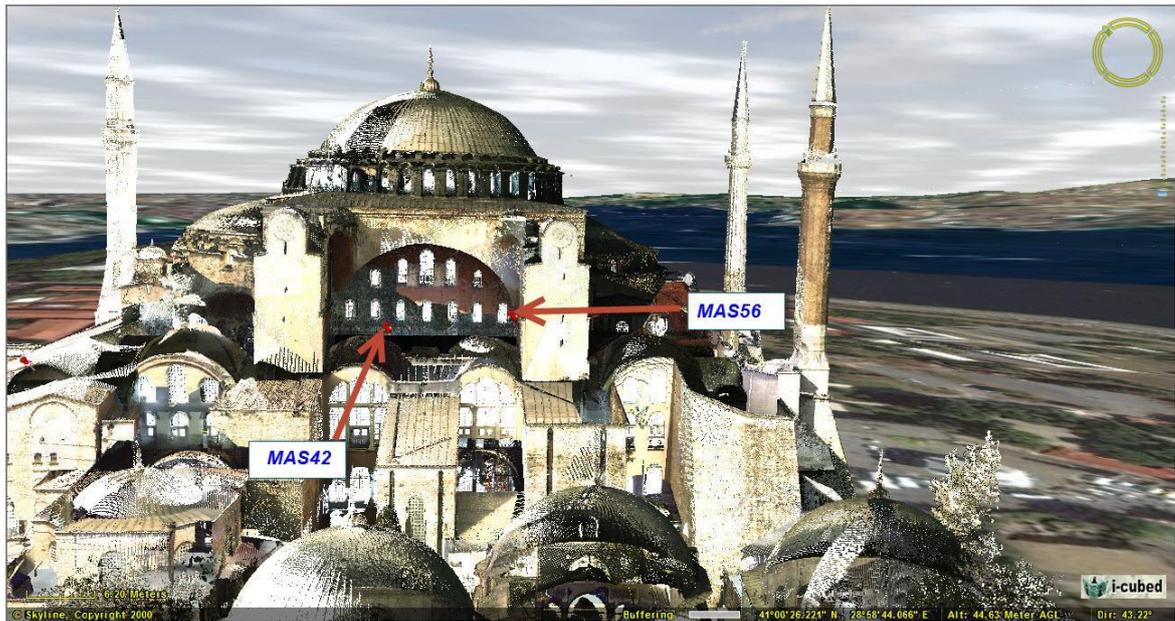


Fig. 3.5. Campioni prelevati dal prospetto sud, riportati nella schermata del GIS 3D.

3.2 Cenni su malte

Con il termine di malta si indica una “miscela di leganti inorganici ed organici, aggregati prevalentemente fini, acqua ed eventuali aggiunte di additivi organici e/o inorganici in proporzioni tali da conferire all’impasto, allo stato fresco, un’opportuna lavorabilità e, allo stato indurito, adeguate caratteristiche fisiche, meccaniche, di aspetto, di durabilità ecc.”(UNI 10924, 2001).

La malta è dunque un impasto di consistenza plastica, costituito prevalentemente da legante, aggregato ed acqua, la cui funzione principale è quella di legare tra loro materiali lapidei naturali o artificiali, formando con essi un insieme compatto. Questo impasto, infatti, è in grado di trasformarsi progressivamente, attraverso reazioni chimiche irreversibili, in un prodotto di consistenza litoide che, una volta indurito, presenta una buona aderenza alle superfici con cui viene a contatto ed una determinata resistenza meccanica (Pecchioni et al., 2008).

Le malte rientrano tra i materiali lapidei artificiali più utilizzati dall’uomo. Il loro uso è da sempre stato molto diffuso grazie alla loro facilità di realizzazione, di applicazione e la loro spiccata economicità. Poiché esiste una grande varietà di malte, è possibile fare una

distinzione considerando diversi fattori come ad esempio l'*ambiente* in cui si trova il materiale, che porta alla distinzione di *malte per interni* e *malte per esterni* (Bugini e Folli, 2003). La *destinazione d'uso* e la *funzione*, porta invece alla distinzione tra: *malte per muratura* (di allettamento o di riempimento), *malte per intonaci*, *malte per rivestimenti* (pavimentazioni, pareti, ecc.), *malte per decorazioni* (a spessore, rilievo, statuarie ecc.), *malte per impieghi particolari* (stuccature, stilature, sigillature, ecc.) e *malte con caratteristiche particolari* (pigmentate, resistenti all'umidità, alle intemperie, ecc.) (Bugini e Folli, 2003).

L'uso delle malte risale a tempi remoti e diffuse sono le testimonianze del loro utilizzo in tutto il mondo (Schiele e Berens, 1976; Bensted, 1997; Stark e Wicht, 1999; Bensted e Coleman, 2004; Pecchioni et al., 2008). La produzione tecnologica delle malte raggiunse il suo apice con i Romani che si appropriarono delle conoscenze già consolidate dai Greci e dagli Etruschi (Sersale, 1991; Palleschi, 1997; Giachi e Palleschi, 2005), migliorando notevolmente la tecnologia di produzione della calce aerea ed ampliando la diffusione delle malte nell'edilizia. Il loro uso nell'architettura è stato datato intorno alla fine del II secolo a.C. (Cagnana e Mannoni, 2000; Collepari, 2003) e da questo momento il loro impiego divenne sempre più frequente.

Il livello tecnologico elevato raggiunto dai Romani nella realizzazione delle malte, testimoniato dall'ottimo stato di conservazione di moltissimi manufatti, è strettamente legato ai validi metodi di lavorazione del materiale ed alla scelta delle materie prime.

L'arte della realizzazione delle malte si estese poi alle varie regioni dell'Impero romano. L'apice dello splendore edilizio si raggiunse nel III sec. d.C. per andare ad esaurirsi lentamente fino alla caduta dell'Impero Romano d'Occidente (V sec d.C.) quando, nello stesso periodo, in Messico, i Toltechi iniziavano ad utilizzare la calce (VII sec d.C.).

L'utilizzo delle malte a base di calce continuò nel trascorrere dei secoli, con livelli tecnologici più o meno elevati, fino a quando con la Rivoluzione Industriale, tra la fine del XVIII e l'inizio del XIX sec., fu introdotto il cemento Portland. Questo materiale, che sembrava mostrare caratteristiche migliori rispetto alle classiche malte a base di calce, causò un graduale abbandono delle malte tradizionali. Tuttavia, con il tempo, le caratteristiche del cemento non sono state del tutto soddisfacenti facendo rimpiangere, in molti casi, l'uso delle tradizionali malte.

3.3 Il processo produttivo di una malta

Il processo produttivo di una malta richiede una serie di fasi, in primo luogo vi è l'approvvigionamento delle materie prime, quindi la scelta del materiale inerte che andrà a costituire l'aggregato e del calcare necessario per la produzione della calce. La granulometria del materiale inerte dipende dal diverso utilizzo della malta e generalmente deve essere variabile in modo da rendere l'impasto compatto, colmando i vuoti presenti tra i granuli. L'aggregato più usato è la sabbia, generalmente proveniente da spiagge lacustri o dagli alvei dei fiumi non torrentizi, dove l'argilla viene separata durante la sedimentazione. L'uso di sabbia marina era invece sconsigliato, anche nella trattatistica antica, a causa della presenza di sali (Vitruvio, De Architectura, II, IV – Gros, 1997).

Oltre alla scelta del materiale inerte è molto importante quella del calcare per la realizzazione della calce. In genere per la produzione della calce veniva privilegiata la scelta di calcari piuttosto puri con alto tenore di calcio, di colore chiaro, senza venature o patine di alterazione, tessitura microcristallina e grana fine.

Successivamente si passa alla cottura del calcare (o calcinazione) mediante la quale avviene la decomposizione termica della roccia, sottoposta ad una temperatura prossima ai 900 °C. La calcinazione provoca la dissociazione del carbonato di calcio in ossido di calcio (*calce viva*) ed anidride carbonica secondo la reazione seguente:



La reazione di calcinazione necessita calore (circa 397 Kcal per ogni Kg di calcare) e provoca una perdita di volume pari al 44% della massa iniziale per un calcare puro, per la dolomite si ha una perdita in peso del 47.7%, mentre per la magnesite pura una perdita in peso di circa 52% (Rattazzi, 2007). Questo processo, in condizioni di pressione atmosferica, comporta una prima fase di precottura (intorno a 200°C) durante la quale avviene la disidratazione della roccia; successivamente (a partire da una temperatura di circa 550 °C) si ha la dissociazione dei carbonati fino a 900 °C, quando il processo di calcinazione può ritenersi concluso. In genere non è consigliabile salire a temperature più elevate per evitare processi di sinterizzazione che portano alla formazione di una calce bruciata (o cotta a morte) poco porosa e quindi difficilmente reattiva ed idratabile. La porosità della calce viva è fondamentale per ottenere una calce con buone proprietà di

legante poiché i pori consentono all'acqua di penetrare più velocemente idratando al meglio il materiale.

La calce viva (CaO), ottenuta dalla cottura del calcare, per esplicare le sue proprietà di legante deve subire un processo di spegnimento (estinzione) attraverso l'aggiunta di acqua, che provoca la formazione dell'idrossido di calcio (*calce spenta*).



Se nel calcare di partenza è presente della dolomite o del calcare magnesiaco anche l'ossido di magnesio, formatosi durante la cottura, si trasforma in idrossido. La reazione di spegnimento è fortemente esotermica ed espansiva, infatti, avviene con la produzione di una grande quantità di calore (calore di idratazione pari a 278 Kcal per Kg di CaO (Rattazzi, 2007)) e con un significativo aumento di volume che può essere di due o tre volte quello del volume iniziale.

Per ottenere un materiale con ottime proprietà di legante è necessario lasciare l'acqua a contatto con la calce per un periodo di tempo abbastanza lungo, in modo da completare il processo di spegnimento. Se questo non è completo, all'interno dell'impasto possono crearsi dei grumi di ossido di calcio non ancora spento, che possono andare incontro a processi di idratazione dopo la messa in opera e creare, in seguito all'aumento di volume, la formazione di fessurazioni e distacchi nelle murature.

I grumi di calce, formandosi durante il processo di spegnimento della calce, presentano una composizione identica al calcare di partenza, di conseguenza il loro studio può risultare molto importante per ottenere informazioni sulle caratteristiche del calcare utilizzato per la produzione della calce (Barba et al., 2009; Bakolas et al., 1995).

Dopo lo spegnimento della calce viva, vi è un periodo di maturazione, stagionatura o invecchiamento del legante, durante il quale si conserva il prodotto idratato in ambiente anaerobico (sotto un velo d'acqua, coperto di sabbia umida o in contenitori ermetici) per un opportuno periodo di tempo in modo da impedire l'evaporazione dell'acqua e favorire il completamento della reazione di idratazione. Le disposizioni romane richiedevano una stagionatura di almeno tre anni prima dell'uso, in modo che anche le parti più difficili da idratarsi potessero spegnersi senza lasciare residui.

Nel momento in cui la malta viene messa in opera, inizia a solidificare ed ad acquistare la massima resistenza attraverso due processi: “presa” e “indurimento”. La presa avviene nelle prime ore o nei primi minuti, questa è legata all'evaporazione dell'acqua d'impasto e

termina quando la massa mantiene la forma data. L'indurimento, invece, prosegue nel tempo e si conclude quando la massa raggiunge le sue massime proprietà meccaniche. L'indurimento è legato *processo di carbonatazione* attraverso il quale l'idrossido di calcio reagisce con l'anidride carbonica presente in aria per formare nuovamente il carbonato di calcio iniziale:



In base al legante utilizzato, le malte possono essere "aeree" o "idrauliche". Le prime sono in grado di far presa ed indurire solo a contatto con l'aria; mentre le altre vanno incontro a questi processi anche in presenza d'acqua.

Mentre l'indurimento di una malta in presenza d'aria genera una resistenza meccanica ridotta e richiede tempi brevi, quello in acqua, al contrario, avviene in tempi più lunghi ma permette di ottenere un materiale con una resistenza meccanica maggiore.

In particolare, quando si ha a che fare con una calce idraulica, il processo di presa ed indurimento è in parte aereo ed in parte idraulico, poiché è legato sia alla carbonatazione dell'idrossido di calcio che all'idratazione dei silicati e degli alluminati presenti nella calce. L'acqua aggiunta durante la realizzazione dell'impasto, infatti, reagisce chimicamente con i silicati e gli alluminati di calcio (formatosi in seguito alla combinazione dell'idrossido di calcio con la silice e l'allumina) portando alla formazione di idrati stabili e insolubili che permettono al materiale di indurire e rimanere stabile anche sott'acqua.

L'idraulicità di una malta è legata al contenuto di "*idrauliti*" (elementi come silice ed allumina che sono i costituenti principali dell'argilla). Questi reagiscono con l'ossido di calcio durante la calcinazione (tra 600 e 900 °C) formando silicati ed alluminati di calcio instabili che, a contatto con l'acqua, tendono subito a reagire dando luogo a composti insolubili. L'idraulicità di una malta è legata quindi alla percentuale di argilla presente, e viene determinata attraverso *l'indice di Vicat* (o *indice di idraulicità*) dato dal rapporto argilla/calcare, espresso come:

$$i = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}}$$

Questo indice rappresenta la capacità di una malta a legante idraulico, di far presa ed indurire in un tempo minore o maggiore e di conservare le proprietà di resistenza anche in ambiente umido o sommerso (Pecchioni et al., 2008). In funzione di tale indice è possibile

distinguere le calci in: *debolmente* idrauliche, *mediamente* idrauliche, *propriamente* ed *eminente* idrauliche (Boynton, 1966) (Tab. 3.2).

Tipo di calce	% di Argilla	Indice di Vicat	Tempo di presa	Tempo di indurimento
Calci debolmente idrauliche	5-8	0.10 - 0.16	15 giorni	1 mese
Calci mediamente idrauliche	8-15	0.16 - 0.31	10 giorni	2 settimane
Calci propriamente idrauliche	15-19	0.31 - 0.42	5 giorni	1 settimana
Calci eminentemente idrauliche	19-22	0.42 - 0.50	2-4 giorni	meno di 4 giorni
Calci limite (cementi normali)	22-27	0.50 - 0.65	2-4 giorni	meno di 4 giorni

Tab. 3.2. Distinzione delle calci in base all'indice di idraulicità (De Luca, 2013).

In base alla diversa natura delle materie prime è possibile effettuare una distinzione tra *calci idrauliche naturali*, ottenute dalla cottura di calcari marnosi (rocce con una percentuale di argilla compresa tra l'8 e il 20%) o marne (rocce di origine sedimentaria costituite in prevalenza da calcare, argilla e minerali quali allumina, silice ed ossido di ferro) sottoposti a temperature generalmente comprese tra 1100 e 1250 °C; e *calci idrauliche artificiali*, ottenute dalla cottura di miscele costituite da calcare e argilla.

È inoltre possibile ottenere calci idrauliche mescolando la calce aerea con additivi idraulicizzanti come ad esempio la pozzolana (roccia vulcanica) o frammenti di laterizi e/o altri prodotti ceramici. Queste sostanze, usate come additivi, sono ricche di silice ed allumina che permettono la formazione di silicati ed alluminati di calcio, comunemente chiamate fasi C-S-H (Taylor, 1997; Hodgkinson e Hughes, 1999).

3.4 L'importanza dello studio delle malte

Le malte, nonostante apparentemente sembrino delle miscele semplici, sono in realtà dei materiali molto complessi, con una storia ed una tradizione millenaria. Con la prova della limitata resistenza del cemento e dei problemi connessi al suo impiego a contatto con i materiali dell'edilizia tradizionale, le malte sono rientrate nel panorama del costruito, soprattutto nel campo del restauro e del recupero urbano. Allo stesso tempo, da parte della comunità scientifica, si è sviluppato l'interesse per lo studio di questi materiali che nascondono un'elevata complessità, legata alla notevole variabilità chimica, mineralogica e petrografica delle materie prime utilizzate per la loro produzione (De Luca, 2013).

La straordinaria longevità di questi materiali, infatti, attrae l'attenzione di diversi ricercatori, che attraverso vari studi cercano di scoprire i segreti della loro durabilità (Massazza, 1988; Oleson et al., 2004; Silva et al., 2005; Oleson et al., 2006; Gotti et al., 2008; Pavía e Caro, 2008; Goldsworthy e Min, 2009).

Lo studio delle malte rientra in diversi settori, tra loro complementari e sovrapponibili:

- 1) **Diagnostica**: quando lo studio dei materiali è finalizzato all'applicazione di tecniche analitiche mirate alla completa caratterizzazione del materiale, con lo scopo di identificare le fasi ed i processi di degrado ai quali è sottoposto.
- 2) **Conservazione**: quando lo studio è mirato alla conoscenza del materiale al fine di proteggerlo, sperimentando e formulando nuovi prodotti per il restauro compatibili con i materiali antichi e le condizioni ambientali (Elert et al., 2002).
- 3) **Archeometria**: quando lo studio, basato sull'applicazione di strumenti e metodi propri delle discipline scientifiche (Mannoni e Giannichedda, 1996), è finalizzato ad ottenere informazioni relative non solo ai materiali, ma all'intero contesto in cui sono inseriti, quindi informazioni sulla storia costruttiva di un monumento storico-archeologico (individuazione di fasi costruttive, diverse manifatture, informazioni sulla realizzazione del monumento e sulle condizioni socio economiche esistenti al momento della sua costruzione), sulla tecnologia produttiva dei materiali (tecniche di realizzazione degli impasti) e sulle materie prime impiegate (caratterizzazione e provenienza dei materiali).

Questi tre settori hanno trovato un notevole sviluppo soprattutto negli ultimi anni, in seguito all'interesse sempre crescente, verso lo studio e la conservazione del Patrimonio artistico, storico e archeologico. Numerosi sono, infatti, i lavori relativi allo studio delle malte sia per scopi archeometrici che per indagini di tipo diagnostico e conservativo (Bakolas et al., 1995; Vendrell-Saz et al., 1996; Franzini et al., 2000; Moropoulou et al., 2000a; Crisci et al., 2001, 2002; Moropoulou et al., 2003; Damiani et al., 2003; Crisci et al., 2004; Meir et al., 2005; Silva et al., 2005; Miriello, 2005; Miriello e Crisci, 2006; Riccardi et al., 2007; Carò et al., 2008; Pavía e Caro, 2008; Franquelo et al., 2008; Barba et al., 2009; Jackson et al., 2009; Özkaya e Böke, 2009; Miriello et al., 2010a, 2011a, 2011b; Barca et al., 2013; Miriello et al., 2013a, 2013b; De Luca, 2013; De Luca et al., 2013; De Luca et al., 2015).

CAPITOLO 4

METODOLOGIE DIAGNOSTICHE APPLICATE IN LABORATORIO

La ricerca diagnostica a Santa Sofia, oltre all'indagine diagnostica eseguita in situ, ha riguardato anche la caratterizzazione composizionale dei materiali artificiali utilizzati nell'edificio. A tal fine sono stati prelevati dei campioni di malta di allettamento in diversi punti dell'edificio (vedi capitolo 3, paragr. 3.1.) con lo scopo di eseguire una serie di metodologie diagnostiche, finalizzate alla caratterizzazione mineralogica, petrografica e chimica dei materiali. Le metodologie diagnostiche di laboratorio sono elencate di seguito.

4.1 Microscopia ottica a luce polarizzata trasmessa

L'analisi minero-petrografica dei campioni è stata eseguita mediante microscopio ottico polarizzatore a luce trasmessa. Questo strumento (Fig. 4.1a) permette di ottenere un'immagine ingrandita dell'oggetto in esame e di effettuare una serie di operazioni che permettono il riconoscimento delle varie componenti di un materiale (Peccerillo e Perugini 2005).

L'analisi al microscopio ottico polarizzatore a luce trasmessa è finalizzata alla caratterizzazione minero-petrografica dei materiali. Lo studio eseguito su campioni di malta consente di ottenere informazioni dettagliate riguardo all'aggregato, al legante e alla porosità presente. In particolare, attraverso questa analisi è possibile identificare la composizione minero-petrografica dell'aggregato che costituisce la malta, determinando la sua granulometria e forma, la sua distribuzione e la sua orientazione all'interno del legante. Questi aspetti possono fornirci importanti informazioni sulle caratteristiche delle materie prime, sulla modalità di preparazione dell'impasto e sulla messa in opera del materiale.

L'analisi al microscopio ottico, inoltre, permette di identificare la composizione del legante determinando il suo grado di cristallinità, la presenza di grumi o frammenti di pietra mal cotti ed il suo stato di conservazione (presenza di alterazione, zone di ricristallizzazione, aree di ossidazione). Attraverso l'analisi al microscopio ottico è, inoltre possibile, analizzare la porosità primaria e secondaria, ottenendo informazioni sulla quantità di acqua

utilizzata per la miscelazione dell'impasto e sul grado di conservazione dei materiali e il loro stato di degrado (De Luca, 2013).

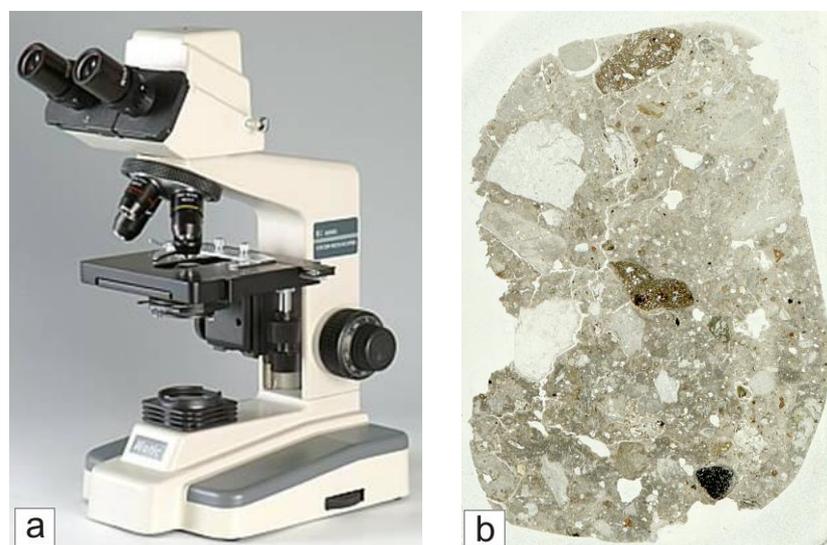


Fig. 4.1. a) Microscopio ottico polarizzatore a luce trasmessa. b) Esempio di sezione sottile di una malta (ingrandimento 3x), immagine a nicol paralleli.

Il microscopio ottico a luce polarizzata consente di eseguire diverse tipologie di osservazioni (Peccerillo e Perugini, 2005):

- Osservazioni al solo polarizzatore dette comunemente a “nicol paralleli” che permettono di analizzare il colore dei minerali, l’eventuale pleocroismo, stimare gli indici di rifrazione e il rilievo;
- Osservazioni a polarizzatori incrociati e luce parallela (osservazioni ortoscopiche) che permettono di analizzare i colori di interferenza (stima della birifrangenza), individuare le direzioni di estinzione dei minerali, zonature e geminazioni;
- Osservazioni a polarizzatori incrociati e luce convergente (osservazioni conoscopiche) che consentono di osservare le figure di interferenza per ottenere informazioni riguardanti l’orientazione e il segno ottico del minerale.

L’analisi al microscopio ottico polarizzatore a luce trasmessa è una tecnica distruttiva che viene eseguita su sezioni sottili (Fig. 4.1b). Queste vengono realizzate attraverso una serie di fasi di lavorazione: per prima cosa il campione viene sottoposto a taglio, attraverso una lama diamantata, in modo da ridurre le sue dimensioni e creare un piccolo mattoncino di circa 1 cm. Se il campione risulta friabile, è necessario, prima del taglio, inglobarlo con

resine epossidiche ad alta penetrazione, in modo da consolidare il campione, renderlo facilmente lavorabile e minimizzare il rischio di rottura. La parte superiore del campione viene poi lucidata con delle paste abrasive ed, in seguito, incollata su un vetrino, con una resina opportuna. Lo spessore del campione viene, poi, ulteriormente ridotto attraverso appositi macchinari (lappatrici), oppure a mano, effettuando una lucidatura con paste abrasive su disco, fino a raggiungere lo spessore standard di 30 μm . In questo modo il campione risulta quasi trasparente e può essere attraversato facilmente dalla luce.

Nel presente lavoro, durante lo studio petrografico in sezione sottile, sono state eseguite le stime volumetriche di aggregato, legante e porosità ($d > 1/16$ mm) utilizzando tavole di comparazione visuale (Ricci Lucchi 1980; Myron Best 2003); mentre le percentuali di cocchiopesto presenti nei campioni sono state stimate mediante analisi d'immagine, utilizzando il software ImageJ 1.48v. L'analisi d'immagine è stata eseguita su sezioni sottili acquisite mediante scanner piano a luce naturale trasmessa, utilizzando il metodo indicato in Miriello e Crisci, 2006.

4.2 Diffrazione a raggi X su polveri (XRPD)

Lo studio mineralogico dei campioni prelevati da Santa Sofia è stato condotto attraverso la diffrazione a raggi X su polveri (XRPD). Si tratta di una tecnica semiquantitativa (talvolta quantitativa nel caso ad esempio dell'applicazione di modelli Rietveld) che permette di identificare le fasi cristalline presenti nel materiale finemente polverizzato, in concentrazione superiore al 5% circa all'interno della massa totale (Raccomandazione Normal 34/91, 1991). L'analisi XRPD viene in genere utilizzata come tecnica di supporto all'osservazione dei campioni al microscopio ottico a luce polarizzata, poiché consente di individuare i minerali criptocristallini non determinabili in sezione sottile.

La tecnica si basa sulla diffrazione, un fenomeno di diffusione elastica che avviene quando la luce attraversa una sostanza caratterizzata da una struttura interna ordinata (in un minerale, infatti, gli atomi sono disposti in una struttura geometrica regolare, seguendo le leggi dell'omogeneo periodico tridimensionale, Morbidelli, 2003). Se un fascio di raggi X incide su un filare di atomi identici di periodo a , ciascuno di essi diventa sorgente di radiazioni X generando un'onda coerente con la radiazione incidente. Le diverse onde interferiranno tra loro in modo costruttivo solo sotto particolari angoli che dipendono dal cammino compiuto da ciascuna onda sferica.

Esistono diversi modi di interpretare il fenomeno della diffrazione dei raggi X da parte dei materiali cristallini, uno di questi è quello proposto da Bragg, secondo il quale per ciascuna famiglia di piani reticolari, caratterizzata da un determinato valore di d , si ha interferenza positiva solo quando si verificano determinate condizioni indicate nell'equazione di Bragg:

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

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 (Fig. 4.2) costituito generalmente da un tubo a raggi X, un portacampione, un rivelatore ed un sistema di amplificazione e registrazione dei dati.

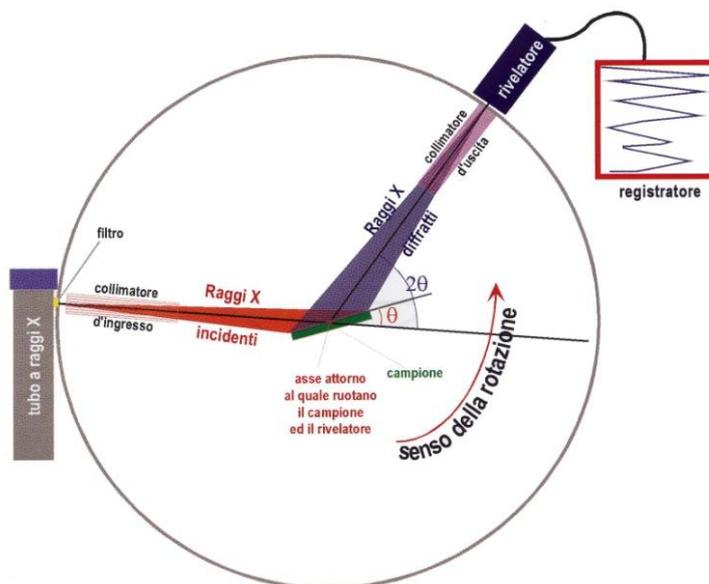


Fig. 4.2. Schema semplificato di un diffrattometro a raggi X (da Morbidelli 2003).

Il campione, finemente polverizzato, viene posto all'interno di un piccolo contenitore che può essere di vetro o di plastica ed inserito all'interno del diffrattometro. Quando il campione ruota di un angolo θ rispetto ai raggi X incidenti, questo risulta posizionato di un

angolo 2θ rispetto alla direzione dello stesso fascio. La velocità di rotazione del rivelatore sarà esattamente doppia rispetto a quella del campione, in questo modo il rivelatore capta i soli raggi per cui viene soddisfatta l'equazione di Bragg. Il segnale fornito dal rivelatore viene amplificato e inviato ad un registratore la cui carta avanza con velocità controllabile; in questo modo si ottiene un diffrattogramma (Fig. 4.3b) in cui sull'asse delle ascisse vi è l'angolo 2θ e sull'asse delle ordinate l'intensità dei picchi di diffrazione (negli strumenti di ultima generazione la registrazione del diffrattogramma avviene in modo digitale). Normalmente la registrazione del diffrattogramma inizia da valori angolari di 5 o 6° di 2θ e termina sui 60 - 65° di 2θ . Utilizzando opportune tabelle di conversione, o determinati software, è possibile risalire, partendo dai valori angolari, alle distanze interplanari d caratteristici delle fasi cristalline presenti.

Nel presente lavoro l'analisi XRPD è stata eseguita mediante un Bruker D8 Advance X-ray powder diffractometer (Fig. 4.3a) con radiazione Cu-K α , operando a 40 kV e 40 mA. I diffrattogrammi sono stati collezionati nel range compreso tra 3° - 60° 2θ utilizzando un intervallo di 0.02° 2θ 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.

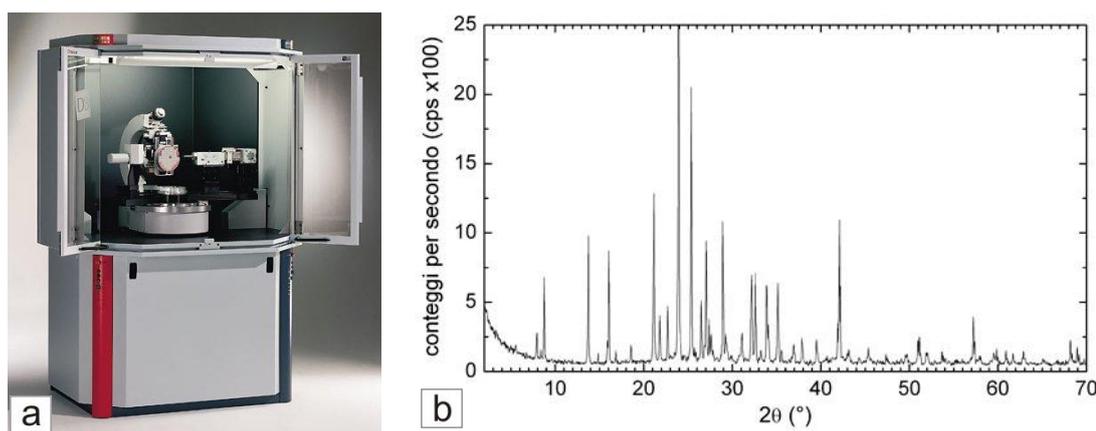


Fig. 4.3. a) Bruker D8 Advance X-ray powder diffractometer utilizzato per l'analisi. **b)** Esempio di diffrattogramma.

4.3 Spettrometria di fluorescenza a raggi X (XRF)

Per la caratterizzazione chimica dei campioni di malta è stata utilizzata la spettrometria di fluorescenza a raggi X (XRF), un'analisi qualitativa e quantitativa che permette di identificare gli elementi maggiori (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5), espressi in percentuale in peso (% wt), e gli elementi in tracce espressi in parti per milione (ppm), presenti nel campione analizzato. Questa tipologia di analisi è fondamentale per lo studio chimico delle malte, non solo per la determinazione della composizione chimica ma anche per l'individuazione di sostanze legate all'alterazione del materiale.

L'analisi si esegue su pasticche, ottenute utilizzando 6 g di campione polverizzato. Questo viene miscelato con dell'alcool polivinilico fino ad ottenere un composto omogeneo. Una volta essiccato il campione viene nuovamente polverizzato e la polvere ottenuta viene posta su fondo di acido borico e pressata in un'apposita vaschetta di alluminio, lavorando ad una pressione massima di 25 bar.

Il principio su cui si basa questa metodologia deriva dalla capacità che hanno tutti gli elementi chimici, se opportunamente eccitati da un fascio di raggi X primario, di emettere altri raggi X secondari, definiti comunemente raggi X di fluorescenza, caratteristici dell'elemento che li emette. I raggi X primari policromatici, prodotti all'interno del generatore, colpiscono il punto da analizzare; tali raggi eccitano gli stati elettronici più profondi degli atomi che costituiscono il campione e provocano l'estrazione di un elettrone da una delle orbite più vicine al nucleo (Fig. 4.4). In seguito, per ristabilire l'equilibrio energetico all'interno dell'atomo, un secondo elettrone più esterno può riempire la lacuna liberando un fotone X di fluorescenza (raggi X secondari caratteristici dell'elemento chimico colpito).

L'analisi viene eseguita mediante uno spettrometro X (Fig. 4.5) composto principalmente da un tubo a raggi X che produce il fascio primario (l'anticatodo può essere di Cr, Sc, Rh, Ag, W o Au); un porta campione all'interno del quale si pone la pasticca; uno o più cristalli analizzatori per analizzare lo spettro dei raggi X emesso dal campione ed un rivelatore che raccoglie e trasforma i raggi X riflessi dal cristallo in impulsi elettrici. Le righe caratteristiche, che sono emesse tutte insieme dal campione eccitato, vengono portate nella condizione di riflettere secondo la relazione di Bragg ($n\lambda = 2d \sin\theta$) tramite la rotazione del cristallo analizzatore. Noto il valore d (equidistanza dei piani reticolari del cristallo

analizzatore) e quello misurato θ , che è ottenuto ruotando il rivelatore fino ad intercettare il raggio riflesso, si ricava dall'equazione di Bragg la lunghezza d'onda λ della riflessione e si risale, da questa, alla natura dell'elemento chimico emettitore.

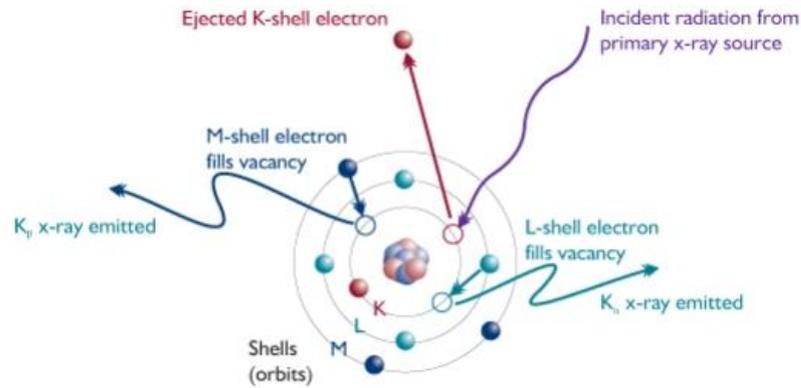


Fig. 4.4. Interazione tra raggi X primari e materia, con conseguente produzione di raggi X secondari di fluorescenza.

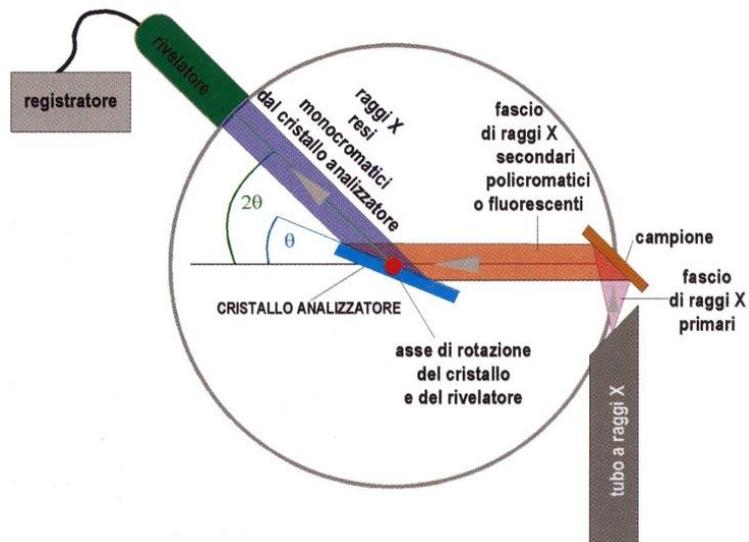


Fig. 4.5. Schema semplificato di uno spettrometro a fluorescenza X (da Morbidelli 2003).

Nel presente lavoro l'analisi XRF è stata effettuata utilizzando uno spettrometro di Fluorescenza Bruker S8 Tiger WD X-ray (Fig. 4.6).

Per avere un'analisi chimica completa e normalizzare i dati ottenuti attraverso l'analisi XRF, è necessario considerare anche il contenuto d'acqua intrappolato all'interno dei reticoli cristallini dei minerali. Per questo motivo viene eseguita sul campione la perdita per calcinazione (LOI = *loss on ignition*) attraverso pesate effettuate prima e dopo aver posto il campione in forno, per circa un'ora, alla temperatura di 900 °C. Naturalmente per evitare che insieme all'acqua di cristallizzazione venga calcolata anche l'acqua di imbibizione e assorbimento, prima di effettuare la misura, è importante lasciare il campione in forno alla temperatura di 110 °C per circa un'ora, in modo da eliminare l'acqua di disturbo non contenuta all'interno dei reticoli cristallini.



Fig. 4.6. Spettrometro di Fluorescenza Bruker S8 Tiger WD X-ray utilizzato per l'analisi.

I dati chimici ottenuti mediante analisi XRF sono stati successivamente sottoposti ad analisi statistica, con lo scopo di evidenziare analogie e differenze altrimenti indistinguibili e difficilmente interpretabili. L'elaborazione è stata eseguita mediante **Cluster Analysis**, una tecnica di analisi multivariata, finalizzata al raggruppamento di elementi omogenei in un insieme di dati. Questa metodologia nasce dall'esigenza di classificare i campioni in gruppi, in base alle loro caratteristiche, quindi in base a similitudini e differenze presenti tra i vari elementi presi in esame. Tale procedura si basa sul concetto di distanza tra due elementi e risulta utile quando è necessario studiare la relazione esistente tra vari gruppi di cui si riconosce già un certo grado di omogeneità, analizzando il loro legame.

Il *Clustering* o *analisi dei cluster* (o ancora *analisi dei gruppi*) è, infatti, una tecnica di riduzione dei dati che raggruppa oggetti in base a misure di similarità. Questa analisi ha come obiettivo quello di assegnare ogni elemento a categorie non definite a priori, formando degli insiemi omogenei al loro interno ed eterogenei tra loro. L'appartenenza o meno ad un insieme dipende da quanto l'elemento preso in esame è distante dall'insieme stesso; quindi il grado di somiglianza tra gli elementi coincide con la distanza che intercorre tra essi. Le relazioni così individuate vengono riassunte e rappresentate graficamente mediante *diagrammi ad albero* (o *dendrogrammi*) (Fig. 4.7).

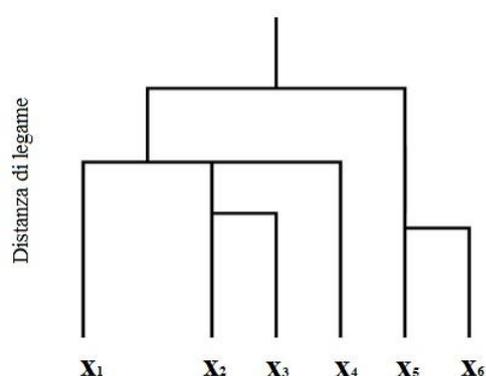


Fig. 4.7. Esempio di dendrogramma ottenuto mediante Cluster Analysis.

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 coefficienti, così ottenuti, sono stati successivamente sottoposti a Cluster Analysis. L'elaborazione statistica è stata effettuata attraverso il software SPSS, utilizzando il metodo di Ward e le distanze Euclidee al quadrato.

4.4 Microanalisi a dispersione di energia (SEM-EDS)

Per ottenere informazioni aggiuntive da un punto di vista petrografico e chimico sui campioni è stata eseguita la microanalisi in dispersione di energia (EDS) mediante microscopio elettronico a scansione (SEM). In particolare, tale metodologia è stata utilizzata per analisi puntuali volte a determinare la composizione chimica del legante e dei grumi di calce presenti nelle malte.

La tecnica può essere non distruttiva, in quanto è possibile operare direttamente sull'oggetto senza alcun tipo di preparazione preliminare, o distruttiva quando si tratta di operare su sezioni sottili lucide (com'è stato fatto in questo lavoro).

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. Attraverso questo strumento è possibile raggiungere ingrandimenti di 100.000x (in realtà circa 20.000 effettivi), partendo da ingrandimenti molto bassi (10-15x), e potendo passare con estrema facilità da un ingrandimento all'altro, mantenendo inalterata la profondità di campo. Il SEM è munito di un catodo di tungsteno che emette elettroni, il quale viene mantenuto ad un potenziale negativo. Il fascio elettronico, passando attraverso delle lenti condensatrici, subisce una riduzione di diametro. Il pennello di elettroni così ottenuto attraversa due bobine di deflessione, alimentate da corrente variabile. La prima ne provoca l'allontanamento dall'asse dello strumento con un'angolazione variabile, per poter così illuminare il campione punto per punto in tempi successivi; la seconda piega il fascio verso l'asse stesso in corrispondenza dell'apertura finale. Il fascio elettronico incontra una lente elettromagnetica che lo focalizza sul campione. Tutta l'apparecchiatura viene tenuta sottovuoto per minimizzare le interazioni di disturbo tra il pennello elettronico e le molecole d'aria. L'impatto del fascio di elettroni sulla superficie del campione determina la produzione di alcuni tipi di segnale, tra cui si ricordano gli elettroni secondari, gli elettroni retrodiffusi ed i raggi X. Gli elettroni secondari si utilizzano per ricavare informazioni di tipo morfologico relative alla superficie studiata, gli elettroni retrodiffusi consentono di individuare la presenza di eventuali fasi cristalline diverse, sulla base delle differenze di numero atomico degli elementi chimici che costituiscono il campione, mentre i raggi X forniscono informazioni qualitative e quantitative sulla composizione chimica del campione.

Per rendere elettricamente conduttrice la superficie del campione e aumentare la qualità delle immagini ottenute, il campione viene precedentemente trattato mediante un processo di metallizzazione, depositando sulle parti da studiare uno strato sottilissimo di metallo (carbonio, oro, alluminio, rame, ecc.).

Nel presente lavoro l'analisi SEM-EDS è stata eseguita mediante un microscopio a scansione elettronica FEI Quanta 200 Instrument, dotato di un detector EDAX Si/Li (Fig. 4.8). L'analisi è stata eseguita su diversi punti del legante (da un minimo di tre ad un massimo di 5) e sui grumi presenti nelle malte (da un minimo di uno fino ad un massimo di tre, in base alla loro presenza).



Fig. 4.8. Microscopio elettronico a scansione FEI Quanta 200 Instrument, dotato di un detector EDAX Si/Li, utilizzato per l'analisi dei campioni.

4.5 Microscopia Elettronica a Trasmissione (TEM)

La microscopia elettronica a trasmissione è stata utilizzata principalmente per indagare lo sviluppo dei silicati di calcio idrati amorfi, comunemente chiamati fasi C-S-H (Taylor, 1997; Hodgkinson e Hughes, 1999) presenti all'interno del legante che costituisce le malte. Come il SEM, anche il Microscopio Elettronico a Trasmissione (TEM) utilizza come

sorgente di radiazioni un fascio di elettroni diretto sul campione. Tuttavia, nel caso del TEM, il fascio di elettroni viene trasmesso, ovvero passa attraverso il campione esaminato. I due strumenti consentono di ottenere, quindi, informazioni differenti, in quanto il SEM è principalmente utilizzato per lo studio delle superfici, mentre il TEM fornisce informazioni circa la struttura interna del campione analizzato.

Il fascio elettronico prodotto nel TEM viene accelerato verso il basso, tramite alto voltaggio e condensato da lenti elettromagnetiche sul campione. Lo spessore del campione deve essere sufficientemente sottile in modo da consentire che gli elettroni incidenti siano in grado di attraversarlo. Durante tale attraversamento molti elettroni vengono assorbiti, mentre altri, vengono deviati irregolarmente. Se l'oggetto è cristallino, parte della radiazione elettronica sarà ulteriormente sottoposta a diffrazione secondo la legge di Bragg (vedi paragr. 4.2).

Il fascio che attraversa il campione, viene focalizzato da una lente "obiettivo" e quindi allargato e proiettato su uno schermo fluorescente che converte la radiazione elettronica in radiazione visibile (Rosati, 1992). L'immagine che si ottiene è rigorosamente in bianco e nero, le parti bianche corrispondono a zone che si lasciano attraversare dagli elettroni, mentre quelle che appaiono scure sono dovute ad un'irregolare deviazione degli elettroni da parte delle dislocazioni della struttura cristallina del campione. La diffrazione di Bragg in sé non produce un'immagine, ma gioca un ruolo fondamentale nel contrasto dell'immagine, perché riduce l'intensità del fascio primario nelle zone in cui si ha diffrazione. Poiché il contrasto di diffrazione dipende dall'angolo con cui il fascio incide sul campione, il portacampioni del TEM è realizzato in modo tale da poter ruotare il campione per trovare le diffrazioni (e quindi i contrasti) che più ci interessano, inclinando in modo opportuno il campione rispetto al fascio. Inoltre, misurando le distanze e gli angoli tra gli spot degli spettri di diffrazione è possibile risalire al tipo di struttura cristallografica con cui si ha a che fare.

Il microscopio elettronico a trasmissione fu inventato da Ruska nel 1931 e perfezionato dai fratelli Hans e Zacharias Janssen nel 1935. Il potere di risoluzione (ovvero la minima distanza fra due punti per la quale si possono distinguere come tali e non come uno solo) raggiunto da questo strumento è di circa 0.2 nm, cioè circa 500.000 volte maggiore di quello dell'occhio umano.

Il microscopio elettronico a trasmissione è costituito da:

- una *colonna cilindrica* alta, cava e sottovuoto, all'interno della quale passa il fascio di elettroni. La parte superiore della colonna contiene un sottile filamento di tungsteno che, riscaldato, agisce come fonte di elettroni.
- *lenti elettromagnetiche* che consentono di deviare il fascio elettronico, mettendolo a fuoco. Sono presenti tre tipi di lenti-magneti: le lenti del condensatore (che mettono a fuoco il raggio di elettroni sul campione), le lenti dell'obiettivo (che raccolgono l'immagine) e le lenti dell'oculare (che ingrandiscono l'immagine ulteriormente).
- una *console* mediante la quale è possibile eseguire le operazioni nella colonna, cioè fornire una determinata corrente per controllare la forza dei magneti. Modificando la corrente applicata alle varie lenti del microscopio l'ingrandimento può variare da 1000 a 250.000 volte.
- *uno schermo*, alla base della colonna, che raccoglie l'immagine finale. Gli elettroni che colpiscono lo schermo eccitano la copertura di cristalli fluorescenti, che emettono luce visibile, percepita come immagine.

Nel presente lavoro di tesi la Microscopia Elettronica a Trasmissione è stata eseguita mediante un Jeol JEM 1400 Plus (120 kV) (Fig. 4.9). Per effettuare l'analisi, i campioni di malta ed intonaco sono stati disaggregati mediante un pestello di agata, dispersi in alcool isopropilico e sottoposti ad ultrasuoni. Successivamente i campioni sono stati depositati su un reticolo di rame ricoperto da una membrana di formar e grafite (80 Å).



Fig. 4.9. Microscopio elettronico a trasmissione (TEM) Jeol JEM 1400 Plus utilizzato per l'analisi dei campioni.

CAPITOLO 5

RISULTATI E DISCUSSIONE DEI DATI

5.1 Acquisizione mediante Laser Scanner

Il rilievo Laser Scanner, effettuato sull'interno e l'esterno di Santa Sofia, è stato articolato nelle seguenti fasi: *acquisizione*, *elaborazione* ed *estrazione* delle informazioni per GIS 3D.

La prima fase, svolta in Turchia, è stata realizzata nel periodo di aprile 2013 ed aprile 2014, durante il quale sono state effettuate scansioni sia dell'interno che dell'esterno di Santa Sofia, raccogliendo più insiemi di punti sparsi nello spazio (comunemente chiamati nuvole di punti) ed immagini georeferenziate. La scansione mediante laser scanner ha riguardato inizialmente le parti interne della basilica (Fig. 5.1 e Fig. 5.2) ed in particolare quelle centrali: cupola, pennacchi, abside, timpani e navata centrale e, successivamente, tutte le superfici esterne (Fig. 5.3).

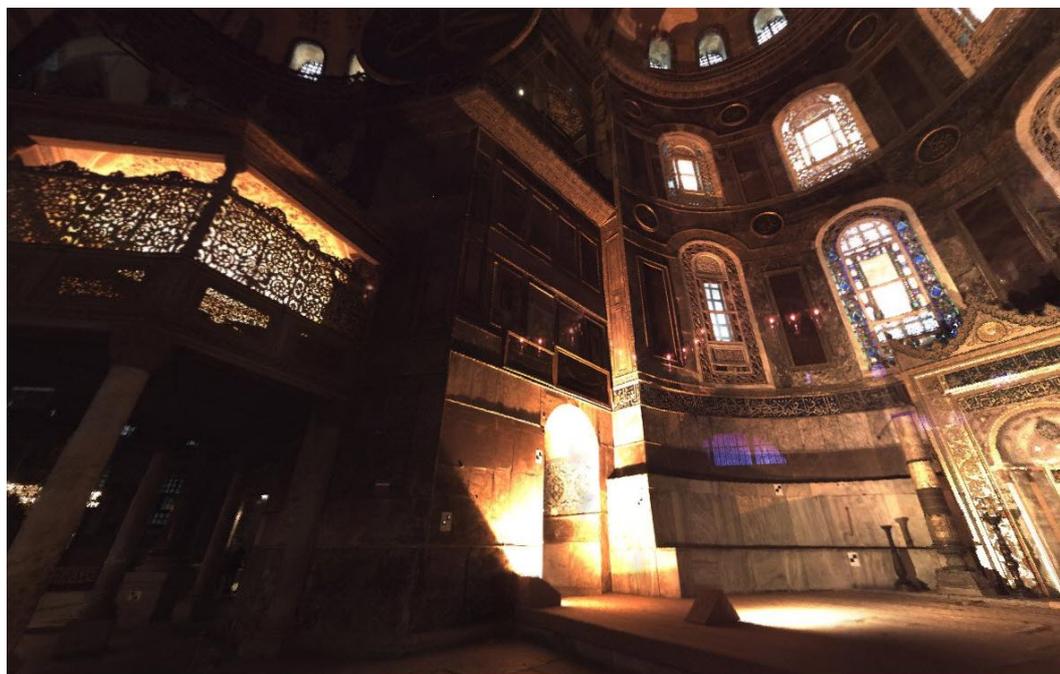


Fig. 5.1. Scansione fotografica 3D dell'interno di Santa Sofia.



Fig. 5.2. Acquisizione laser scanner della nuvola di punti in 3D dell'interno di Santa Sofia.

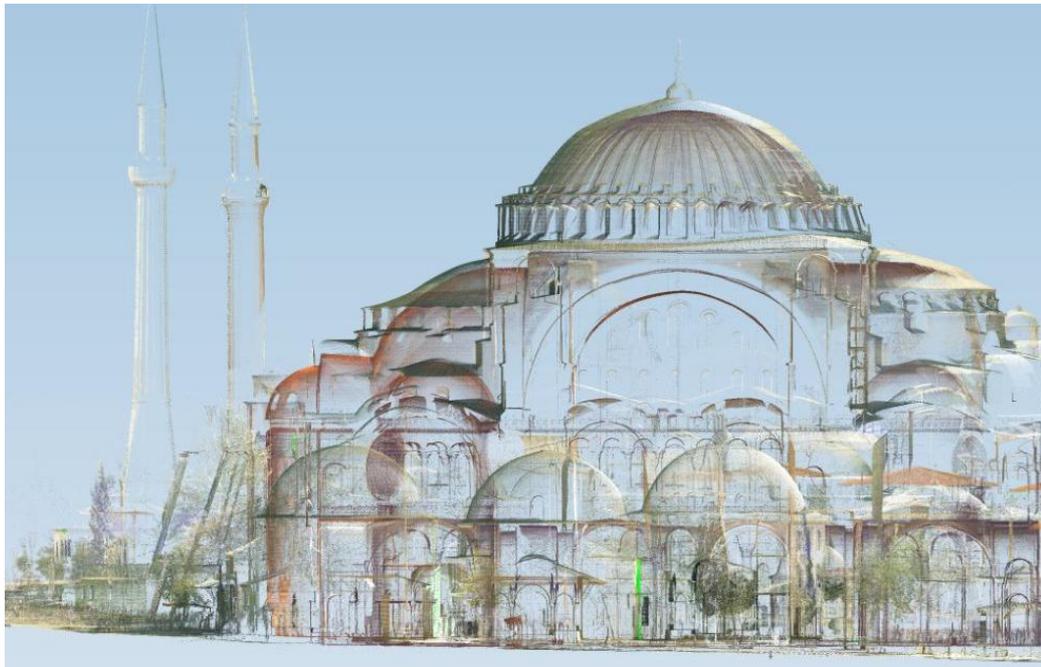


Fig. 5.3. Ricostruzione parziale dell'esterno di Santa Sofia mediante acquisizione Laser Scanner

La seconda fase di elaborazione è stata svolta in Italia, attraverso il software Leica Cyclone, mediante il quale sono state sommate le varie scansioni effettuate, in modo da realizzare un'unica nuvola di punti che racchiudesse l'intero manufatto in oggetto (es. Fig. 5.3). È stato così creato un modello 3D completo, che è stato poi riportato in un unico sistema di riferimento scelto a priori (nel nostro caso il WGS84). Naturalmente, il prodotto finale è il risultato di operazioni di: filtratura della nuvola di punti, eliminazione dei punti

non legati all'oggetto di interesse e colorazione della nuvola di punti attraverso le informazioni RGB acquisite durante le operazioni di rilievo.

La terza ed ultima fase, anch'essa realizzata in Italia presso il Dipartimento DiBEST dell'Università della Calabria, è stata incentrata sull'estrazione del modello finale normalizzato, per poter poi essere integrato nel GIS 3D (Fig. 5.4). Il modello Laser Scanner di Santa Sofia, infatti, rappresenta la piattaforma su cui è stato impostato il database GIS 3D, quindi il supporto su cui sono stati inseriti i dati del database.



Fig. 5.4. Modello tridimensionale di Santa Sofia ricostruito mediante l'acquisizione con Laser Scanner.

Il risultato ottenuto è costituito da un modello navigabile, realistico e di facile ed immediato impatto. La nuvola di punti in oggetto, a causa delle notevoli dimensioni (7.579 gigabyte), rischiava di essere ingestibile per un sistema GIS 3D. Infatti le operazioni di rappresentazione, spostamento e visualizzazione richiedevano sistemi hardware molto potenti, limitando la fruizione del sistema che si stava creando. Per questo motivo si è provveduto ad utilizzare degli applicativi di compressione di cui il software TerraExplorer Professional è fornito, per rendere la nuvola di punti gestibile con qualsiasi sistema hardware.

5.2 Acquisizione mediante Droni

Durante l'elaborazione del modello 3D, acquisito mediante Laser Scanner, sono stati evidenziati degli ostacoli al campo visivo dello strumento di acquisizione, rappresentati sia dagli oggetti interposti tra questo e le superfici da rilevare, sia dalle discontinuità delle superfici stesse. Infatti, superfici adiacenti ma a differente quota generano sulla superficie più lontana dallo scanner (in corrispondenza ad esempio di uno spigolo) una zona d'ombra, la cui ampiezza dipende dalla differenza di quota e dall'angolo di incidenza del raggio laser.

Proprio sulle zone d'ombra, localizzate in fase di elaborazione, sono stati focalizzati gli sforzi per annullarne o ridurne al minimo gli effetti. Tali zone, posizionate soprattutto all'esterno sulle parti sommitali (sporgenze, tetti e minareti), a causa della loro posizione non potevano essere riprese con la classica raccolta laser scanner 3D. Appurata l'impossibilità di posizionare il macchinario di acquisizione sopra i tetti del monumento (che ricordiamo essere alto più di 60 metri) si è deciso un approccio innovativo per colmare queste zone d'ombra, usando gli innovativi sistemi UAV (Unmanned Aerial Vehicle) detti anche Droni (Fig. 5.5 e Fig. 5.6).

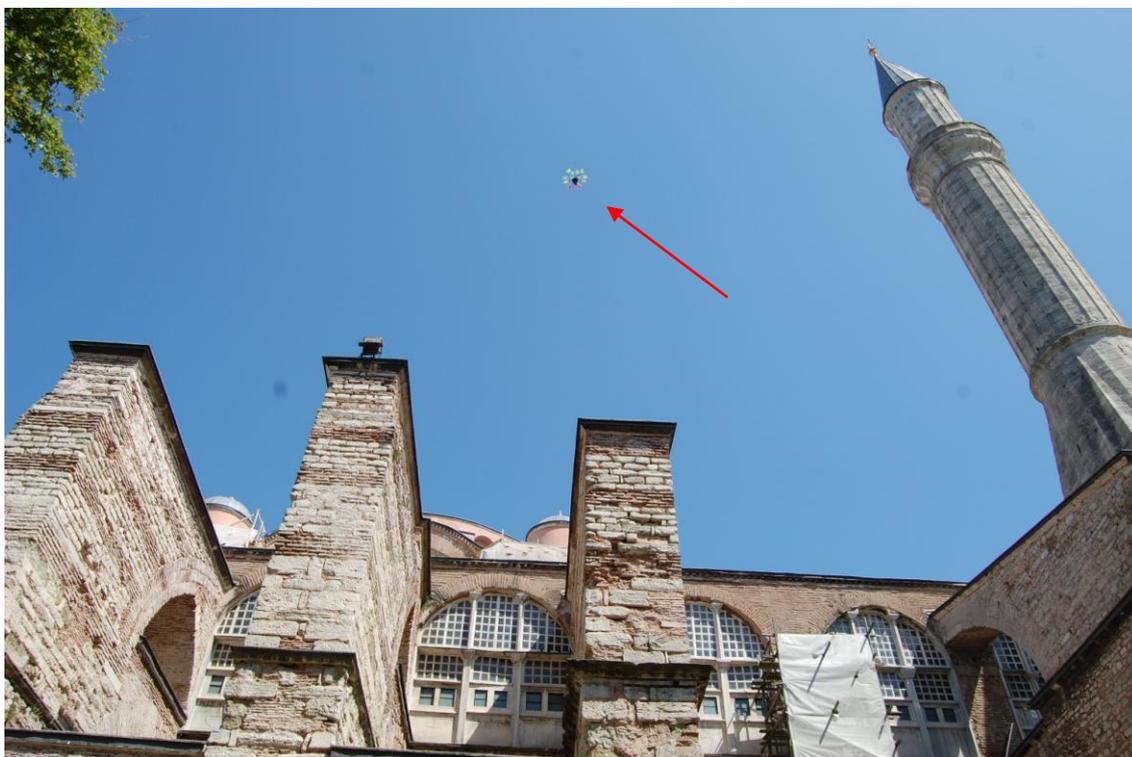


Fig. 5.5. Volo del drone su Santa Sofia.



Fig. 5.6. Volo del drone su Santa Sofia.



Fig. 5.7. Ripresa aerea dall'alto eseguita dal drone in cui è visibile l'intero edificio di Santa Sofia.

Le riprese mediante drone, oltre ad integrare i dati del rendering fotografico, hanno fornito una visione completa dell'intero edificio (Figs. 5.7 e 5.8), consentendo il monitoraggio delle zone più a rischio ed identificando i fenomeni di alterazione e degrado (Raccomandazione Normal 1/88) presenti nella parte esterna dell'edificio (Figs. 5.9 - 5.12)



Fig. 5.8. Ripresa aerea da drone della Cupola di Santa Sofia.

In particolare, per quanto riguarda la cupola, dalle immagini (Fig. 5.9) è possibile notare un'alterazione cromatica delle varie lastre di piombo che costituiscono la cupola e le semicupole. Come evidenziato in Fig. 5.9a (punto 1), esiste una linea di demarcazione in cui si ha una variazione di colore che dipende dalla diversa giacitura delle lastre. Questo fenomeno è evidente anche nelle lastre di piombo poste alla base della cupola (Fig. 5.9a, punto 2) e al contatto tra le lastre di piombo (Fig. 5.9b), punto in cui l'acqua, trovando maggiore appiglio, svolge un'azione di degrado più elevata.

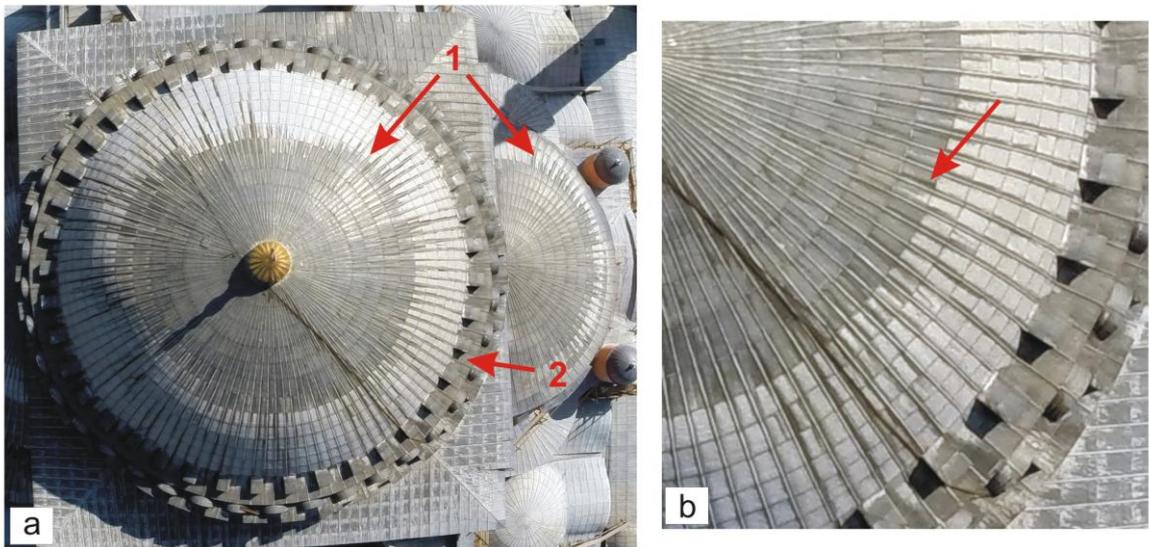


Fig. 5.9. a) Particolare della cupola con alterazione cromatica (foto aerea da drone). b) Particolare dell'alterazione cromatica presente tra le lastre di piombo che costituiscono la cupola.

Altri fenomeni di degrado sono evidenti nel lato nord-est dell'edificio, in particolare è possibile evidenziare la presenza di piante vascolari (Fig. 5.10, punto 1), patina biologica (Fig. 5.10, punto 2) e distacchi dell'intonaco che rendono visibile la struttura interna in laterizi (Fig. 5.10, punto 3).



Fig. 5.10. Lato nord-est di Santa Sofia in cui è visibile la presenza di piante vascolari (1), patina biologica (2) e distacchi dell'intonaco (3).

Sempre nel lato nord-est sono evidenti altri fenomeni di degrado quali: macchie e deposito superficiale (Fig.5.11a), crepe (Fig. 5.11b), patina biologica (Fig. 5.11c) e distacco di alcune lamine di piombo (Fig. 5.11d).

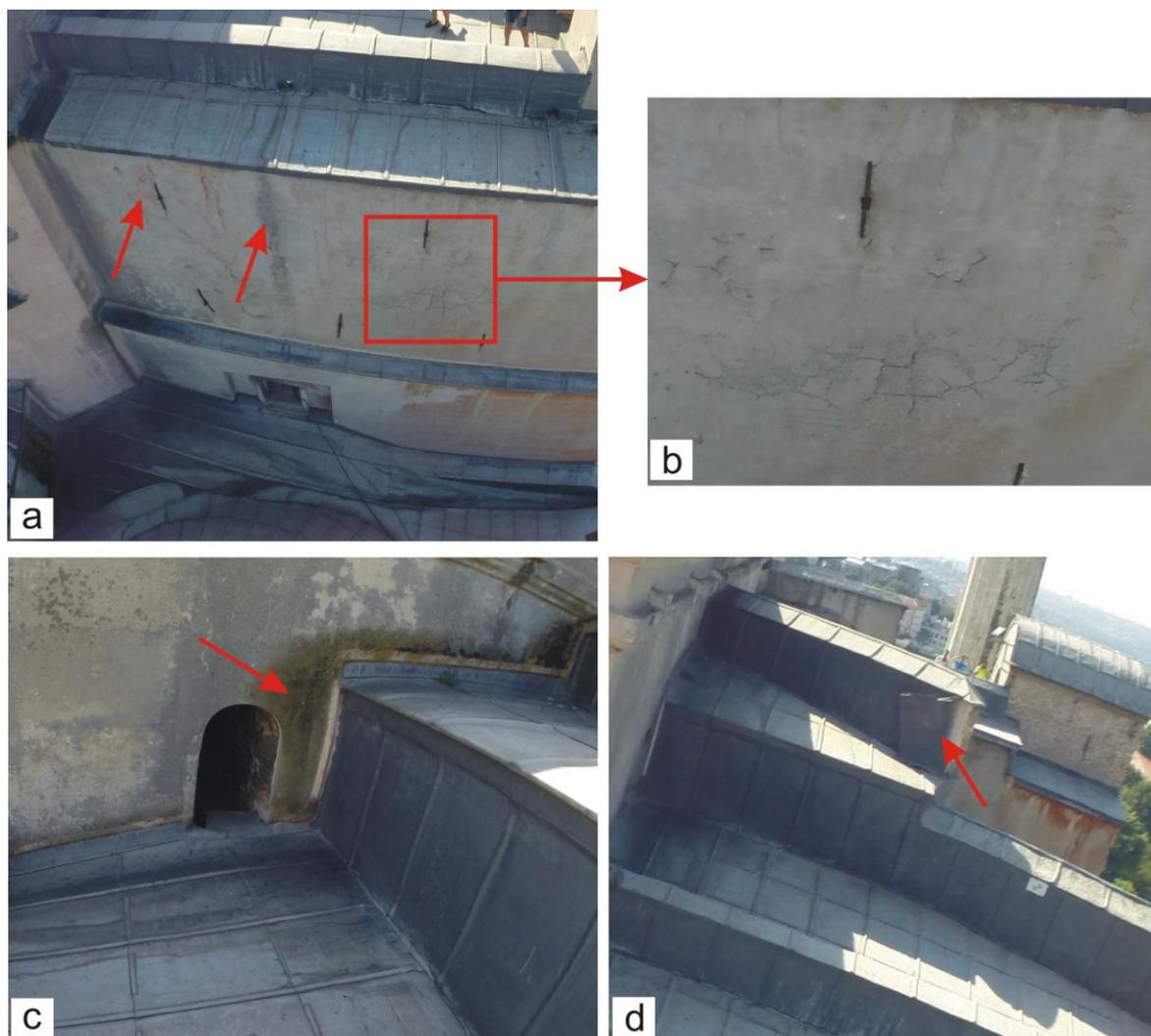


Fig. 5.11. Lato nord-est di Santa Sofia in cui sono visibili diversi fenomeni di degrado: macchie e deposito superficiale (a), crepe (b), patina biologica (c) e distacco di alcune lamine di piombo (d).

Nel prospetto ovest dell'edificio sono inoltre visibili distacchi, esfoliazioni e macchie (Fig. 5.12a) e fenomeni di distacco e polverizzazione di laterizi e calcareniti (Fig. 5.12b).

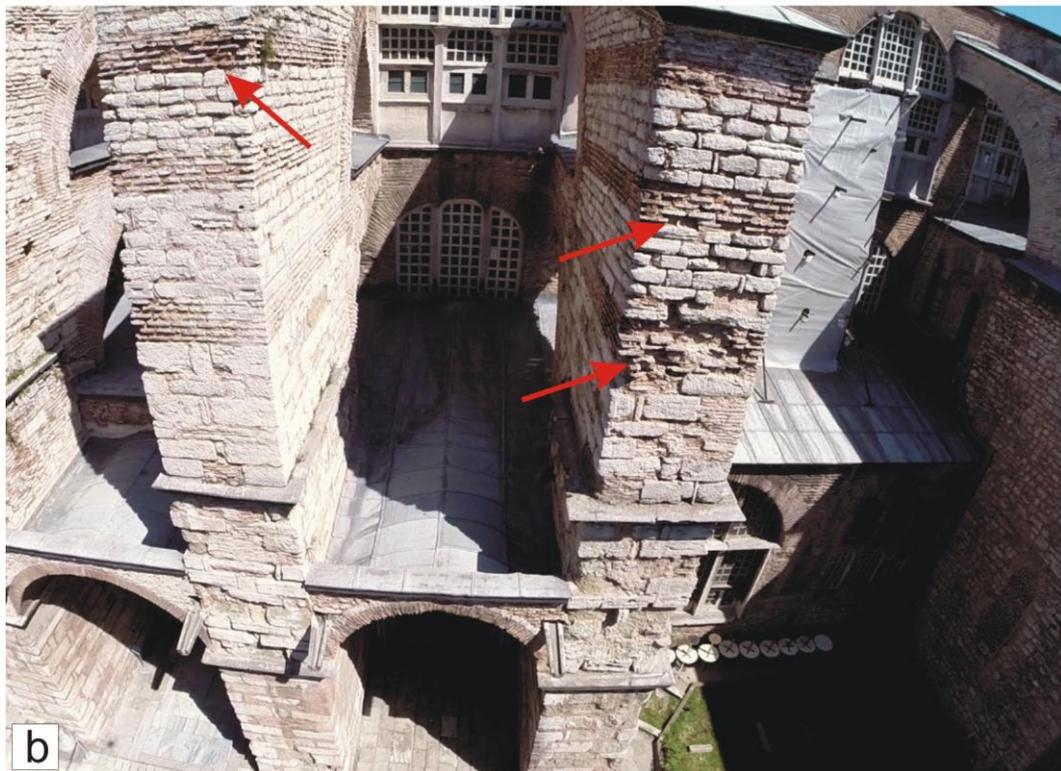


Fig. 5.12. Prospetto ovest dell'edificio con distacchi, esfoliazioni e macchie (a) e polverizzazione di laterizi e calcareniti (b).

5.3 Risultati dell'indagine Georadar

L'indagine diagnostica mediante georadar ha riguardato quasi tutta la pavimentazione del piano terra dell'edificio e la pavimentazione della galleria superiore con lo scopo di individuare la presenza di probabili strutture presenti al di sotto e verificare la presenza di eventuali disomogeneità che potessero spiegare le fratture presenti nelle lastre marmoree della galleria (Crisci et al. 2013).

5.3.1 Risultati dello studio della pavimentazione della navata centrale

Gli studi georadar condotti in precedenza a Santa Sofia si sono concentrati principalmente su problemi di conservazione, sullo studio di pareti e mosaici (Cura, 2010; Moropoulou et al., 2012a, 2012b, 2013) e, solo in parte, sullo studio del piano terra dell'edificio (Yilmaz e Eser, 2005; Yilmaz, 2013).

Con il presente studio, si è deciso quindi, di condurre un'indagine più dettagliata, al fine di comprendere meglio la presenza di eventuali strutture ed il rapporto tra la loro presenza e la stabilità del monumento. La premessa da cui parte lo studio georadar su Santa Sofia è che indagini scientifiche, svolte in precedenza, hanno dimostrato che esiste una deformazione plastica dell'intero edificio (Avdelidis e Moropoulou, 2004; Avdelidis et al., 2004; Erdik e Croci, 2010; Mainstone, 2009; Moropoulou et al., 1998, 2000b; Van Nice, 1965). Come è noto, Santa Sofia ha una storia molto lunga e complessa (vedi capitolo 2). La nostra ipotesi era che i resti della seconda chiesa, distrutta nel 532 d.C., fossero ancora presenti sotto l'attuale piano pavimentale e che la loro presenza potesse essere, almeno in parte, responsabile della deformazione dell'edificio.

Per verificare ciò, si è deciso dunque di condurre delle indagini georadar dettagliate della navata centrale dell'edificio e di quanto è conservato al di sotto del pavimento. Le aree della navata centrale sottoposte ad indagine georadar sono riportate in Fig. 5.13.

La parte meridionale della navata centrale dell'edificio si presentava senza impalcature.

Qui è stata condotta la prima indagine georadar su linee parallele a distanza di 1 m (Fig. 5.13, zona E). Dopo l'analisi dei risultati, si è deciso di intensificare la risoluzione eseguendo un'altra indagine georadar con linee ogni 0.5 m, da sud a nord.

Per esplorare meglio un'anomalia rilevata nell'angolo sud-orientale della zona E, sono state indagate altre due aree: una all'interno della galleria del muezzin (Fig. 5.13, zona F) e l'altra nella parte a sud-est dell'abside (Fig. 5.13, zona G).

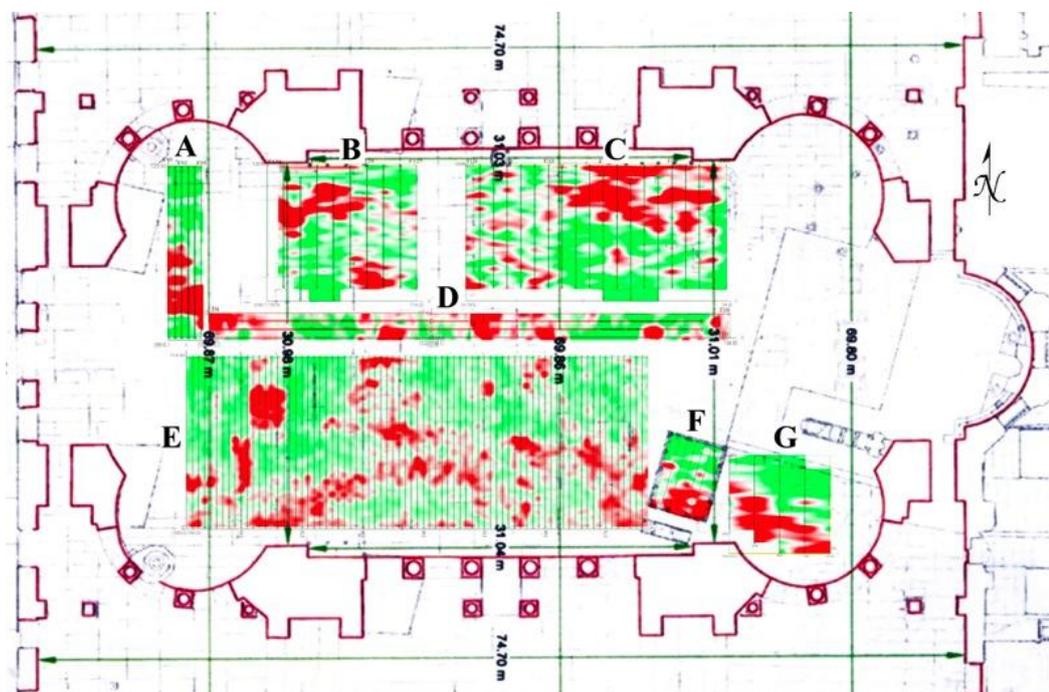


Fig. 5.13. Aree studiate con il georadar. Quella presentata è la slice a 2 metri di profondità. [A: zona nord-ovest. B e C: zona a nord. D: zona centrale. E: zona sud. F: la galleria del muezzin. G: zona sud-est] (Barba et al., in press).

La metà settentrionale della navata centrale invece, era coperta da ponteggi ed impalcature per i lavori di restauro (Fig. 5.14) tuttavia, a causa del lungo termine di questi lavori, si è deciso ugualmente di svolgere l'indagine.

In questa area sono state tracciate delle linee SN nel mezzo dei pali dell'impalcatura, trascinando l'antenna ed il georadar lungo tutto il percorso, da una parte all'altra del ponteggio (Fig. 5.14a). A causa della presenza dell'ascensore e di altre infrastrutture, in alcuni punti, l'indagine è stata suddivisa in diverse zone non continue (Fig. 5.13, zone A, B e C). Questo ha implicato un lavoro difficile e, poiché sotto l'impalcatura non è stato possibile effettuare delle linee ogni 0.5 m (ma ogni metro), per la parte settentrionale è stata ottenuta una risoluzione inferiore rispetto a quella raggiunta per l'altra metà della navata.

L'analisi di una zona con ponteggi costituisce una novità assoluta nelle indagini georadar. Oltre alla sfida pratica di realizzare l'indagine in queste particolari condizioni, andava inoltre presa in considerazione l'esistenza di un rischio di interferenze da parte delle strutture metalliche. Tuttavia i risultati non hanno evidenziato riflessioni prodotte dal ponteggio e, nonostante la difficoltà della ricerca, si è riusciti ugualmente ad ottenere informazioni anche in questa parte di pavimento.

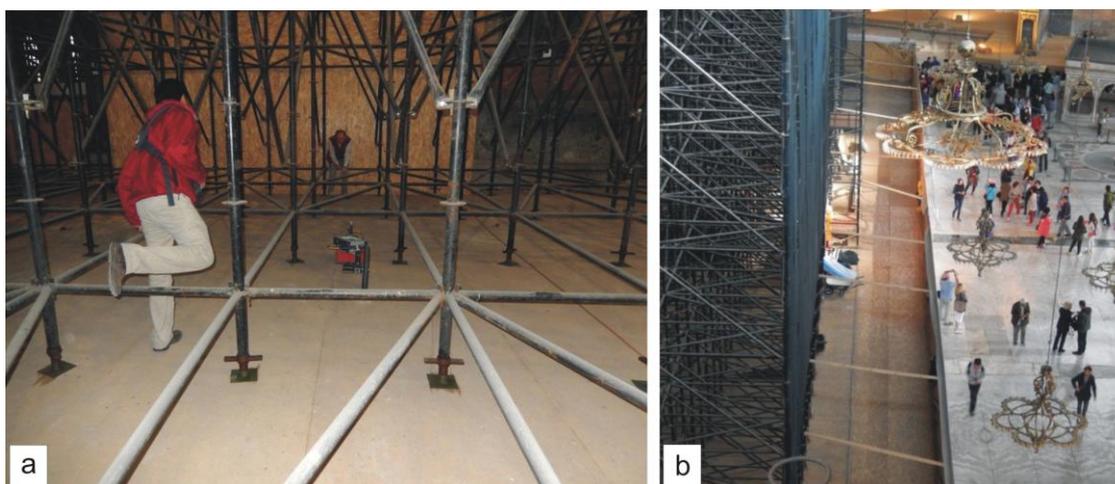


Fig. 5.14. a) Indagine georadar della zona settentrionale della navata centrale sotto l'impalcatura. b) Parte settentrionale della navata coperta da impalcature per i lavori di restauro (a sinistra) e pavimento di marmo di Santa Sofia (a destra).



Fig. 5.15. Acquisizione dei dati georadar sul pavimento della navata centrale vicino al mosaico di marmo. Nella parte posteriore è visibile la galleria del muezzin.

La prima zona indagata riguarda il pavimento di marmo della navata centrale di Santa Sofia (Fig. 5.13, zona D; Fig. 5.14b; Fig. 5.15). Come dimostrato dall'indagine georadar, la

superficie di marmo del pavimento risulta abbastanza omogenea (Fig. 5.16), tuttavia, ci sono alcune aree con caratteristiche diverse.

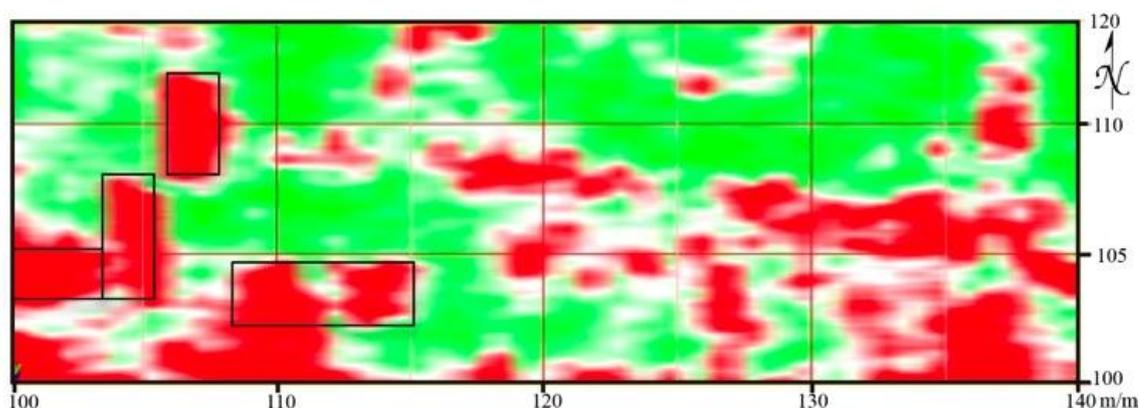


Fig. 5.16. Slice a 1.5 m di profondità dalla parte meridionale del pavimento di Santa Sofia. I rettangoli segnano le riflessioni prodotte dalle aree scavate. Sulla linea delle ascisse sono riportate le coordinate lungo la linea ovest-est (che si leggono come E100, E110 etc.) e su quella delle ordinate le coordinate lungo la linea sud-nord (che si leggono come N100, N105, etc.) (Barba et al., in press).

Osservando l'immagine in Fig. 5.16, riguardante la raffigurazione orizzontale (*slice*) a 1.5 m di profondità, è possibile notare nella parte sinistra delle zone rettangolari in rosso. Queste sono legate all'alterazione del sottosuolo prodotta dagli scavi archeologici durante gli anni cinquanta in alcune aree della parte occidentale del pavimento. Queste aree riflettono il contrasto dovuto alle proprietà del materiale utilizzato per riempire e coprire le aree scavate. In particolare, il moderno cemento armato che sostituisce le lastre di marmo risponde in un modo diverso alle onde elettromagnetiche.

Il resto dell'immagine mostra altre riflessioni ampie che sono, probabilmente, correlate alla presenza di resti architettonici di edifici precedenti sotto il pavimento attuale. Infatti, è evidente l'elevato contrasto di proprietà tra le pietre allineate, contrassegnate in rosso, e la matrice di terra in verde. A destra, nella parte orientale dell'immagine, vi è inoltre, una linea retta rossa che può essere interpretata come un muro spesso. Questa si trova circa nel punto E137, lungo la linea ovest-est (Fig. 5.16).

A metà del XX secolo gli scavi archeologici effettuati in prossimità dell'ingresso principale della navata hanno permesso di mettere in luce la presenza di muri spessi in alcune parti della zona occidentale della navata (Van Nice, 1965; Fig. 5.17).



Fig. 5.17. Immagine che mostra alcune delle aree scavate negli anni '50. Contrassegnate con la lettera d sono delle pareti parallele molto superficiali sotto il pavimento in marmo (da Van Nice, 1965).

Al fine di approfondire la comprensione dei resti di edifici precedenti che potrebbero essere presenti sotto il pavimento di Santa Sofia, dopo i promettenti risultati della prima indagine, si è deciso di proseguire lo studio in due modi. Da un lato, è stata aumentata la risoluzione della scansione con linee ogni 0.5 m della zona E (Fig. 5.13), e dall'altra, è stata ampliata l'indagine alla zona sotto il ponteggio (Fig. 5.13 zone B e C).

Nella *slice* a profondità 2 m con alta risoluzione, cioè con la scansione ogni 0.5 m, è possibile osservare i muri già osservati nella fotografia dei vecchi scavi.

Altre prove dell'esistenza di pareti possono essere riconosciute in Fig. 5.18 nelle linee rosse NS e nelle bande rosse EW, nella parte inferiore e superiore della figura. Tutti questi segmenti potrebbero rappresentare i limiti di un antico edificio sepolto sotto Santa Sofia.

La parete di chiusura della struttura sul lato est è chiaramente visibile ad una profondità di 1.2 e 1.6 m, mentre la parete nel lato sud raggiunge quasi 2 m di profondità. Il limite occidentale di questa struttura non è chiaro come i precedenti.

In Fig. 5.18 l'allineamento delle riflessioni principali è contrassegnato in giallo per indicare le pareti ed il perimetro di questo edificio sottostante. L'indagine georadar indica che i resti

di questo edificio dovrebbero essere posizionati tra 1.2 e 1.8 m di profondità. Nella zona sud, a causa della maggiore risoluzione dell'indagine georadar, gli allineamenti sono ben definiti; mentre nella zona nord, dove la densità è più bassa, l'immagine è sfocata.

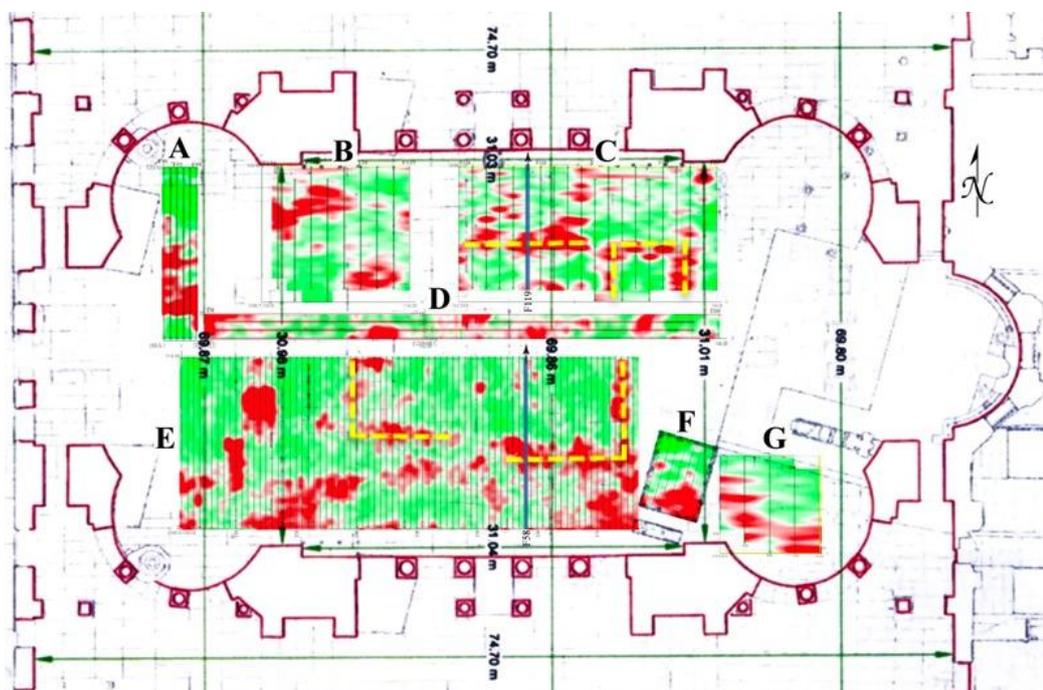


Fig. 5.18. *Slice* della navata centrale del piano terra di Santa Sofia alla profondità di 1.5 m. In giallo l'interpretazione di una struttura. In blu le linee del georadar che passano dove ci sono le pareti (Barba et al., in press).

Le pareti sono visibili anche nei radargrammi in Fig. 5.19, dove il radargramma F1 mostra riflessioni dovute a metalli al metro 4 e sotto il muro spesso che è stato scavato negli anni '50. Nella linea F10 è possibile osservare l'alterazione causata dal riempimento dell'area di scavo da 3 a 7 metri, mentre nella linea F13, le riflessioni multiple tra 8 e 12 m sono probabilmente prodotte da metallo presente nel riempimento dell'area di scavo.

I radargrammi mostrano anche un netto cambiamento nelle proprietà degli strati superiori (Fig. 5.19), suggerendo la presenza di un livello pavimentale precedente che dovrebbe trovarsi a 30-40 cm al di sotto del pavimento di marmo attuale. Nel primo metro delle tre linee (F1, F10 e F13 in Fig. 5.19) è anche possibile osservare le riflessioni che suggeriscono la presenza di un altro muro nel limite meridionale della zona studiata.

Prendendo in considerazione questi dati è possibile proporre una ricostruzione ipotetica della pianta di un'antica struttura al di sotto del piano pavimentale attuale.

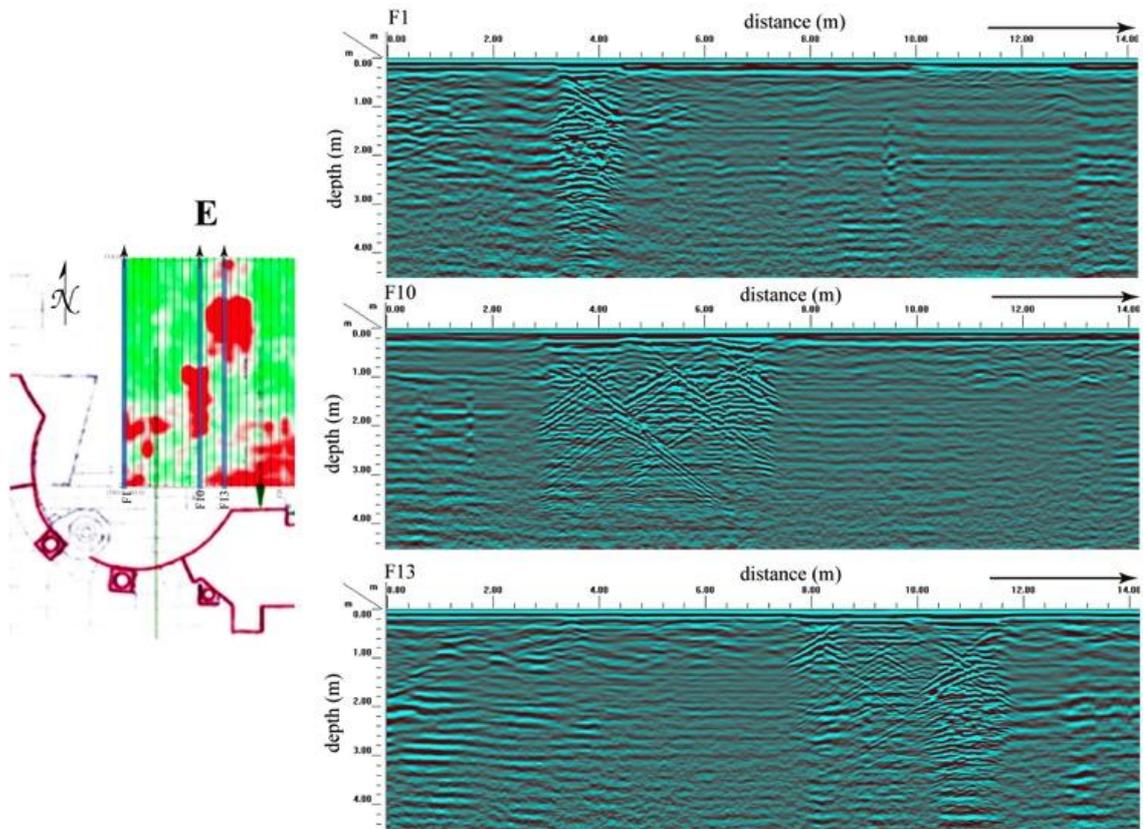


Fig. 5.19. Radargrammi individuali F1, F10 e F13 che mostrano riflessioni multiple nella parte occidentale della navata centrale (Barba et al., in press).

Le riflessioni nei radargrammi in Fig. 5.20 possono essere interpretate come muri spessi. La linea F58 mostra il muro della parte meridionale della sottostruttura che sembra essere ben conservato, mentre la linea F119 mostra il muro che corrisponde al limite settentrionale della struttura sottostante, che sembra essere più distrutto vicino la superficie. Tali dati suggeriscono che vi è un edificio sotto l'attuale Santa Sofia, piuttosto piccolo, con una lunghezza di 22 m (sull'asse E-W) ed una larghezza di 18 m (sull'asse N-S). La maggior parte dei resti di questo edificio devono essere collocati a meno di 2 m sotto il piano pavimentale attuale.

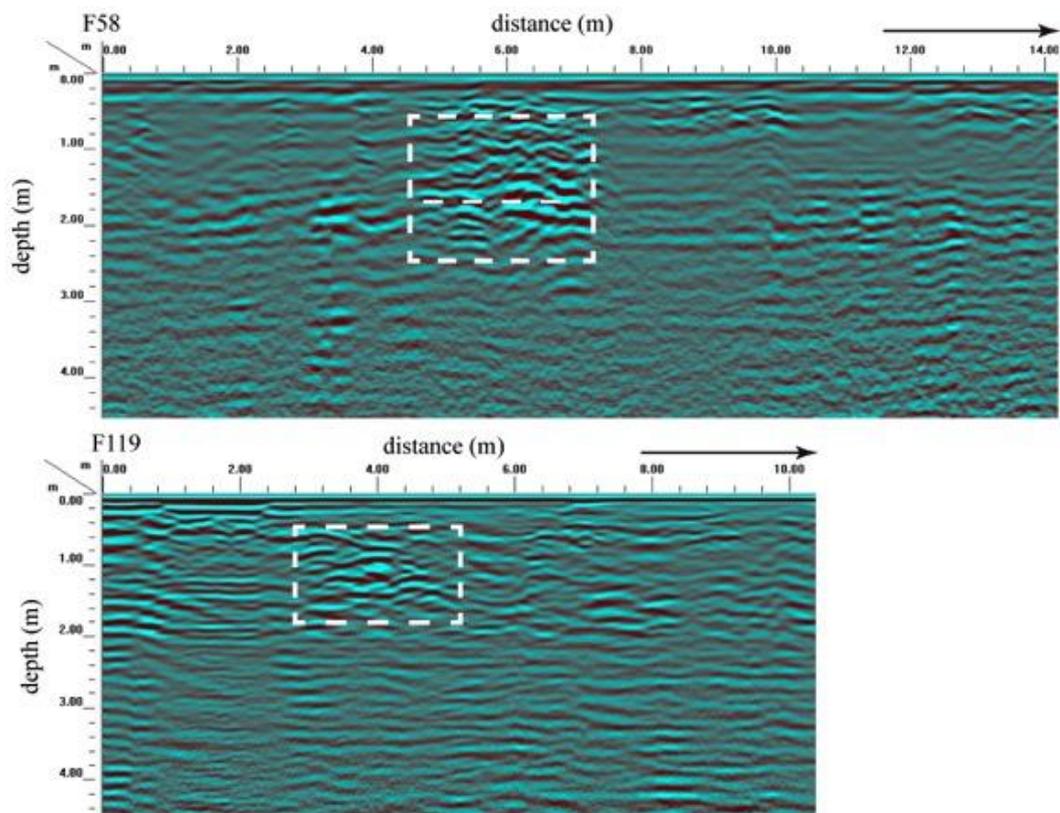


Fig. 5.20. Radargrammi delle linee F58 e F119 che mostrano le riflessioni provocate dalla presenza di muri (Barba et al., in press).

Come è evidente dalla Fig. 5.18 vi sono delle riflessioni anche nell'angolo sud-orientale, dove si trovano la galleria del muezzin e la parte sud-est dell'abside. Queste riflessioni mostrano un allineamento interessante che ha una direzione NW-SE. Osservando i radargrammi, in Fig. 5.21, è possibile infatti osservare le tracce di una struttura, leggermente al di sotto del livello delle pareti precedentemente menzionate. Nella linea F68, da 4 a 7 metri, vi sono riflessioni che suggeriscono la presenza di muri a 2 m di profondità. Nel radargramma della linea F72 (Fig. 5.21) vi sono alcune riflessioni disordinate nella prima parte (0-3 m). Tra 4 e 5 metri, a circa 2 m di profondità, vi è una leggera riflessione che suggerisce il bordo di un elemento, che è più chiaramente visibile nel radargramma della linea F75 e F77, dove si presenta come una riflessione iperbolica. Ciò che è rilevante è che questa struttura è a 1.5-2 m sotto il mosaico di marmo che si trova nella parte SE della pavimentazione della navata centrale.

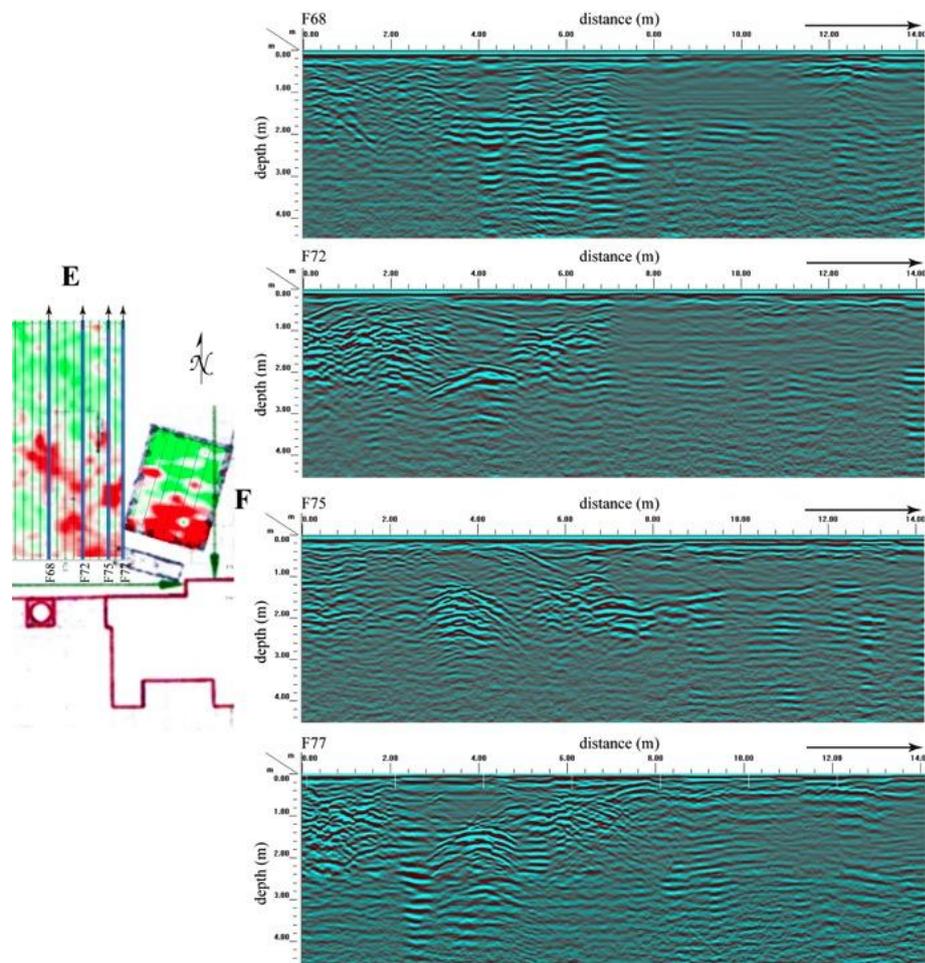


Fig. 5.21. Radargrammi delle linee F 68, 72, 75 e 77, che mostrano la riflessione importante a 1.5 m di profondità.

Nella linea F77 (Fig. 5.21), la zona di riempimento va da 3 a 5 m e suggerisce la presenza di un materiale conduttore ed omogeneo. In questo radargramma, che si trova a 1 m di distanza dalla linea F75, è possibile osservare che ci sono due muri ai lati della riflessione iperbolica. Nella stessa posizione, vicino alla superficie è possibile osservare nella linea F77, la presenza di un elemento lineare a 30 cm di profondità, che potrebbe essere connesso al collocamento dei marmi del mosaico.

Prendendo in considerazione gli ultimi sei radargrammi paralleli, si nota che mostrano tutti una riflessione importante che potrebbe essere connessa ad un possibile elemento che è almeno 3 m di lunghezza e 2 m di larghezza.

I dati georadar riportati suggeriscono che, probabilmente, prima di mettere il piano pavimentale attuale, è stata scavata un'area di 4 x 4 m, raggiungendo almeno 2.5 m di

profondità, e che sono stati costruiti almeno due muri ai lati di quest'area, al fine di costruire quella che sembra essere una possibile camera. Successivamente il vuoto è stato riempito con materiale molto omogeneo e coperto con lastre disposte 30 centimetri sotto l'attuale pavimento a mosaico.

Questi dati sono interessanti in quanto indicano che vi è un elemento sotto il mosaico visibile nel piano pavimentale attuale, che potrebbe essere stato collocato lì per mantenere la memoria della posizione di questo elemento.

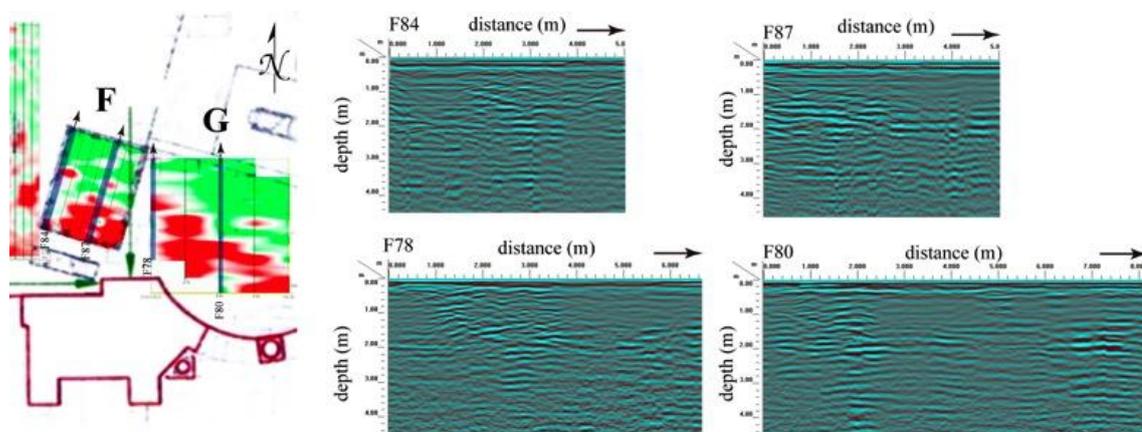


Fig. 5.22. La figura mostra la posizione delle linee F84, 87, 78 e 80 ed i rispettivi radargrammi. Le linee F84 e F87 sono all'interno della galleria del muezzin. Le linee F78 e 80 sono nella parte sud-orientale di Santa Sofia (Barba et al., in press).

All'interno della galleria del muezzin, i radargrammi delle linee F84 e F87 (Fig. 5.22) mostrano una riflessione orizzontale vicino ai 2 m di profondità. Sotto quello strato, nei primi due metri dei radargrammi, vi è una leggera riflessione che suggerisce un qualche tipo di alterazione antropica.

Non si può escludere che si tratti di un canale che potrebbe essere parte dei "pozzi, passaggi, tunnel e sistemi idrici" precedentemente rilevati da Özkan-Aygün (2006) in altre parti dell'edificio. Tuttavia, fino ad ora, non abbiamo dati sufficienti per suggerire la funzione di questo elemento. Le linee F78 e F80 nella parte sudorientale di Santa Sofia, mostrano riflessioni nei metri 1 e 2 a 1.5 m di profondità che seguono una direzione verso l'angolo sud-est.

Nel complesso, si può dire che l'interpretazione dei risultati georadar della navata centrale di Santa Sofia mostrano che ci sono testimonianze architettoniche sepolte a diversi livelli al di sotto del piano pavimentale.

Una volta identificati tali resti, al fine di comprendere meglio se questi possono essere correlati alla deformazione dell'edificio, sono stati confrontati i dati del georadar con la carta topografica della superficie pavimentale, ottenuta con l'elaborazione dei dati della scansione laser 3D dell'intero dell'edificio realizzata nell'ambito del progetto (Fig. 5.23).

Prima di commentare la mappa, è importante ricordare che l'area rettangolare nell'abside della navata centrale non deve essere presa in considerazione, in quanto corrisponde alla presenza di una struttura di legno posta nella zona, che alza il livello del pavimento registrato dalla scansione 3D.

E' interessante osservare che la carta topografica della pavimentazione della navata centrale di Santa Sofia rivela che non ci sono né deformazioni né cambiamenti topografici nella superficie dopo oltre 15 secoli di utilizzi diversi dell'edificio (Fig. 5.23). Questo indica che la sepoltura delle strutture precedenti è stata fatta con estrema cura, utilizzando materiali adeguati e compattando in modo corretto il tutto, in modo tale che, pur essendoci resti di strutture precedenti sotto il pavimento di Santa Sofia, il piano pavimentale della navata centrale è stabile, senza quasi deformazioni.

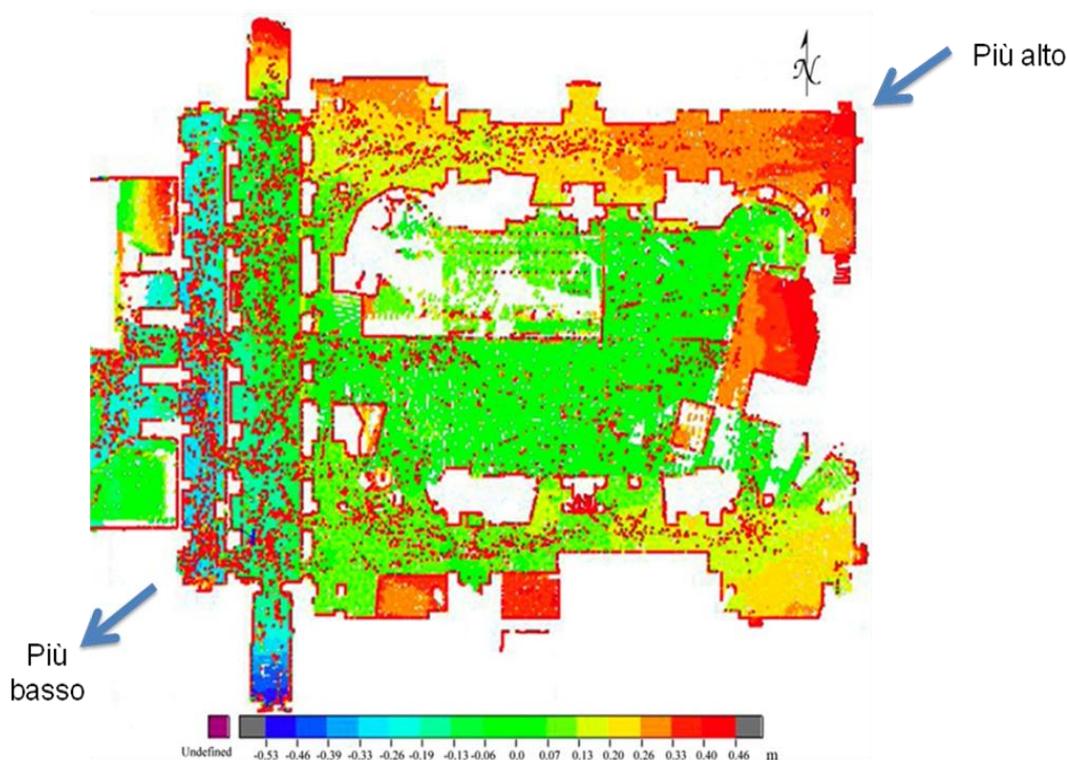


Fig. 5.23. Mappa topografica della pavimentazione di Santa Sofia ottenuta mediante scansione 3D . Nella navata centrale il verde indica una zona pianeggiante (Barba et al., in press).

Al contrario, nelle navate laterali è possibile osservare lievi variazioni del livello del pavimento, che indicano una sorta di deformazione della superficie. I dati ottenuti indicano dunque che l'edificio è inclinato (Fig. 5.23). Ciò è evidente soprattutto nella parte nord, dove vi è un aumento dell'altezza di 40 cm. Studi futuri dovrebbero, dunque, tener conto dell'indagine georadar delle navate laterali per capire se esiste una relazione tra la presenza di strutture sottostanti, se vi è una diversa topografia della zona e quale è la causa della deformazione dell'edificio.

5.3.2 Risultati dello studio delle gallerie del piano superiore

Per verificare la deformazione degli archi sottostanti il pavimento delle gallerie superiori sono state, inoltre, condotte delle indagini nel pavimento della galleria superiore, effettuando in totale sei linee geo-radar (Fig. 5.24).

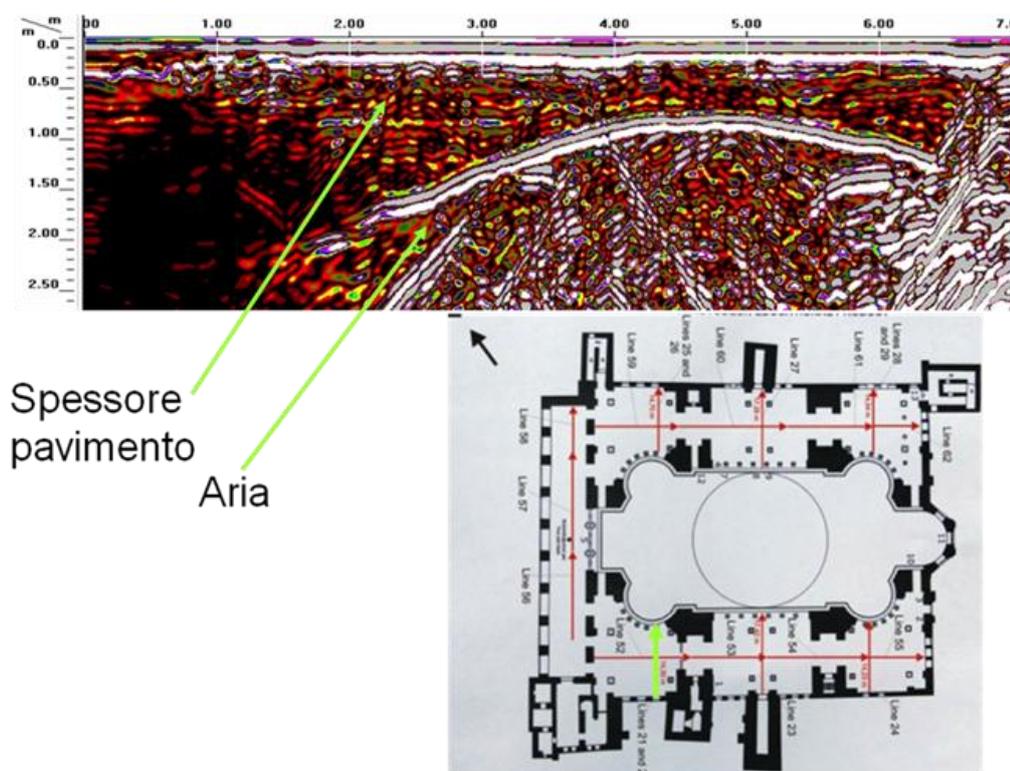


Fig. 5.24. Posizionamento e radargramma della prima linea (in verde). Nell'immagine si vedono tutte le linee effettuate.

Nel radargramma in Fig. 5.24 è possibile osservare un arco abbastanza simmetrico. Lo strato superiore nel radargramma è il pavimento di marmo da dove è passata l'antenna, mentre la curva indica il vuoto presente sotto l'arco. Nel primo metro del radargramma si apprezza una certa irregolarità, che contrasta con l'omogeneità del resto della linea. Alla termine della linea è possibile notare, invece, molte riflessioni, probabilmente dovute all'avvicinarsi del radar alla ringhiera di metallo. Lo spessore minimo del materiale sull'arcata è di 80 cm.

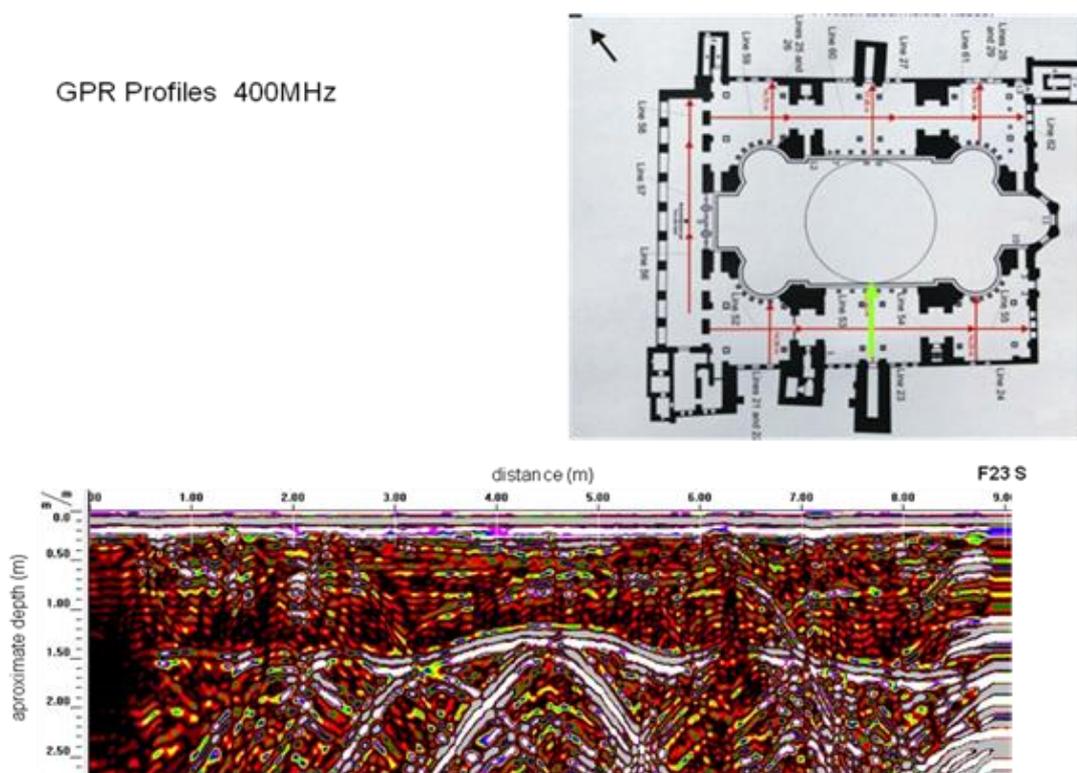


Fig. 5.25. Posizionamento e radargramma della linea 23.

La linea 23 (Fig. 5.25) è stata effettuata al centro del corridoio sud e risulta molto differente dalla linea precedente poiché essa non forma un arco. Questo probabilmente è dovuto al fatto che il radar, in questa zona, passa al centro di quattro pilastri che sostengono il soffitto. La cosa più interessante di questa linea è che a 2 m e a 6.2 m si osservano riflessioni quando la linea interseca qualche elemento collocato sotto il pavimento. Lo spessore nel punto centrale diventa pari a 1.2 m circa. Nella parte iniziale del radargramma è evidente, inoltre, un materiale diverso che forse è da ricollegare alla

presenza del contrafforte. Una situazione analoga si osserva nella linea 27, simmetrica a questa, che in quel caso termina nel contrafforte provocando riflessioni simili.

Le riflessioni nella parte finale del radargramma sono influenzate dalla presenza della ringhiera metallica.

Nella linea 24 (Fig. 5.26) appare di nuovo l'arco, ma qui è leggermente deformato. A 5.6 m dall'inizio del radargramma si apprezza, infatti, un cambiamento nella superficie, che si estende fino alla deformazione dell'arco. In futuro dovrà essere verificato se questa deformazione dell'arco sussiste davvero o è prodotto di una disomogeneità nel pavimento.

Le riflessioni tra i 50 cm e 3 metri e dopo i 6.5 metri probabilmente dipendono dalla presenza di lampade appese al pavimento (che è il soffitto della parte inferiore) o metalli.

Qui lo spessore dell'arco diminuisce fino a 70 cm nel punto più alto dell'arco.

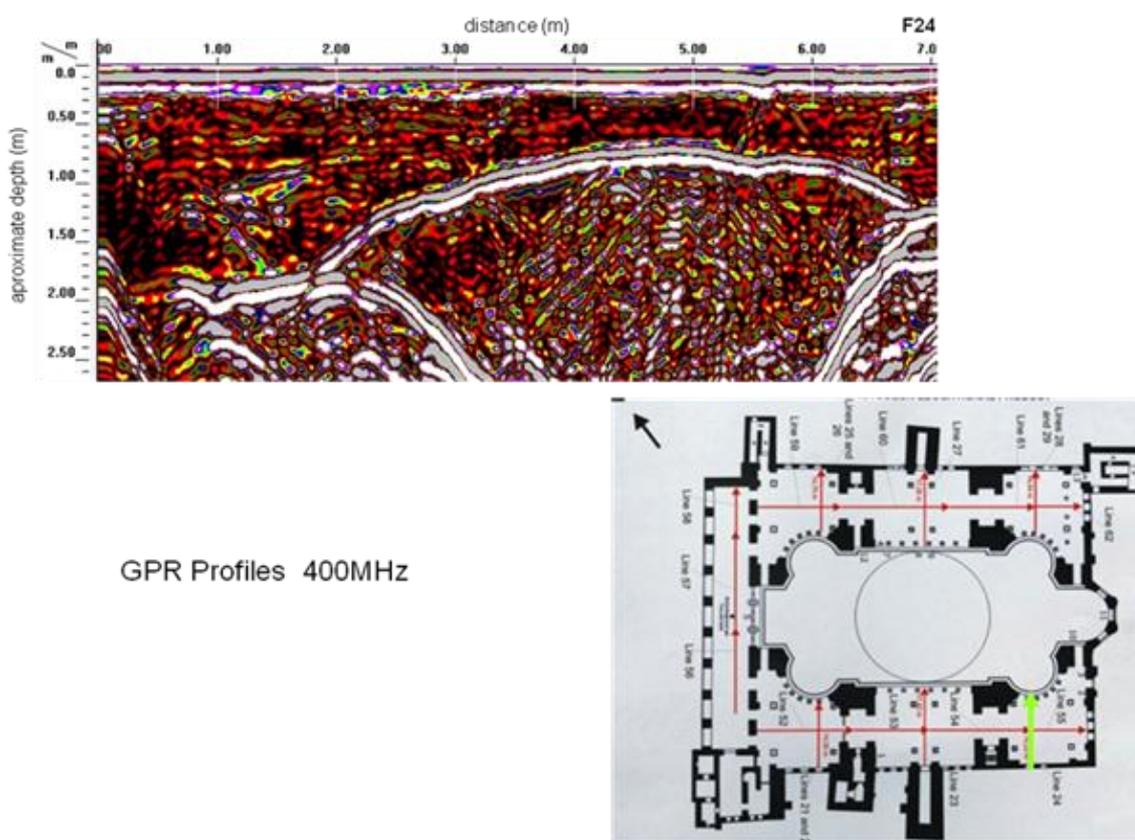


Fig. 5.26. Posizionamento e radargramma della linea 24.

Nella navata nord, la linea 25 (Fig. 5.27) è molto diversa dalle precedenti, con variazioni apprezzabili nelle caratteristiche del riempimento. La linea forma due archi separati con la riflessione più alta a circa 60 cm di profondità ed un'altra linea tra 4.5 e 5.5 m del percorso. Tra 1 e 2 m si osserva una discontinuità ed un cambiamento nelle proprietà del riempimento, mentre dai 5.5 m si osserva un cambiamento nello strato superiore ed una zona più scura in tutto lo spessore del riempimento.

In futuro sarà necessario indagare se vi sono cambiamenti nella superficie pavimentale, se è presente qualcosa nel soffitto del piano terra che spieghi queste anomalie oppure se queste derivano da un cambiamento nell'arco. E' importante ricordare che quando sono state fatte le indagini radar vi era, in questa zona, un allestimento di pannelli con abbondante uso di metalli. Le riflessioni nella parte iniziale del radargramma dipendono probabilmente dalla presenza della ringhiera metallica.

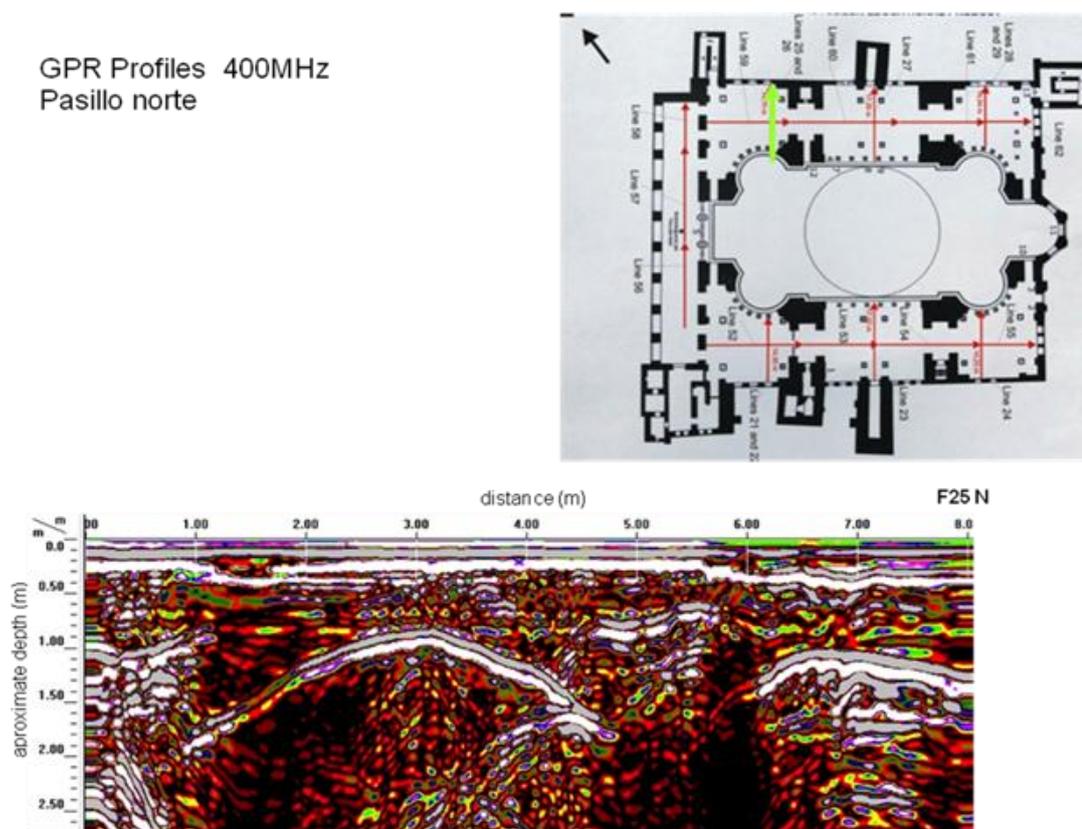
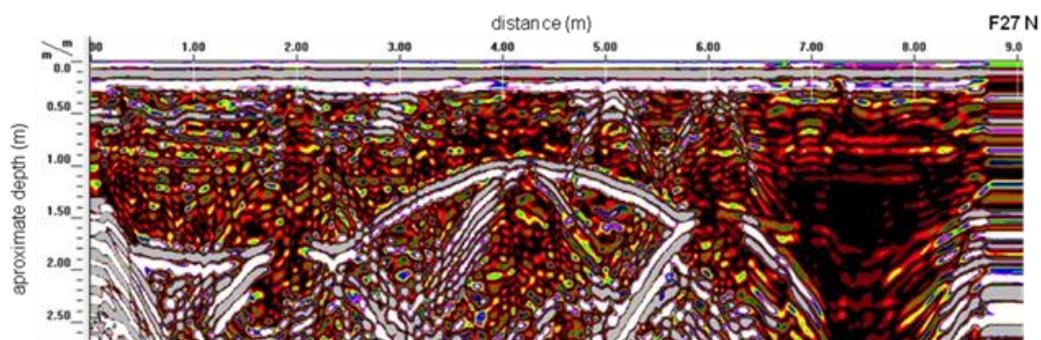


Fig. 5.27. Posizionamento e radargramma della linea 25.

La linea 27 (Fig. 5.28), confrontata con la linea equivalente della navata sud, mostra delle analogie. Qui è evidente il suo arco ed un riempimento abbastanza omogeneo. Tuttavia, a

6.5 m cambia di nuovo il comportamento del materiale di riempimento e si nota una zona più scura. Le riflessioni al di sotto dell'arco possono essere dovute alla volta a crociera presente nel piano inferiore oppure alla presenza di candelabri appesi.



GPR Profiles 400MHz

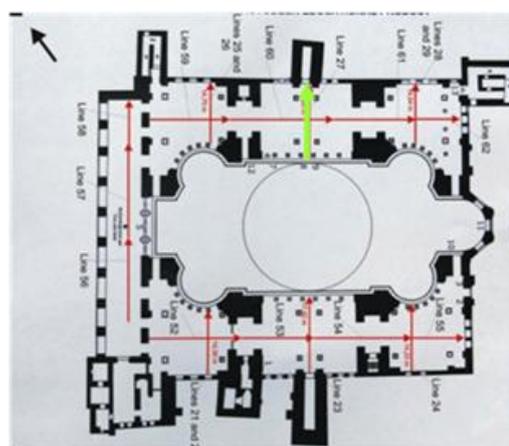


Fig. 5.28. Posizionamento e radargramma della linea 27.

Nella linea 28 (Fig. 5.29) si osserva che l'arco è modificato. E' interessante notare che questo raggiunge lo spessore minimo di 50 cm nel punto più alto dell'arco. Nel resto dell'arco il riempimento è uniforme. Tuttavia, a circa 5 m del percorso del radar si apprezza una riflessione che coincide con una riflessione presente anche nella linea precedente (27). Inoltre, dai 5.5 metri cambia il limite inferiore del piano. Nell'ultima parte del radargramma si osserva un cambiamento simile a quello che si registra nella parte iniziale della linea 24, simmetrica a questa.

GPR Profiles 400MHz

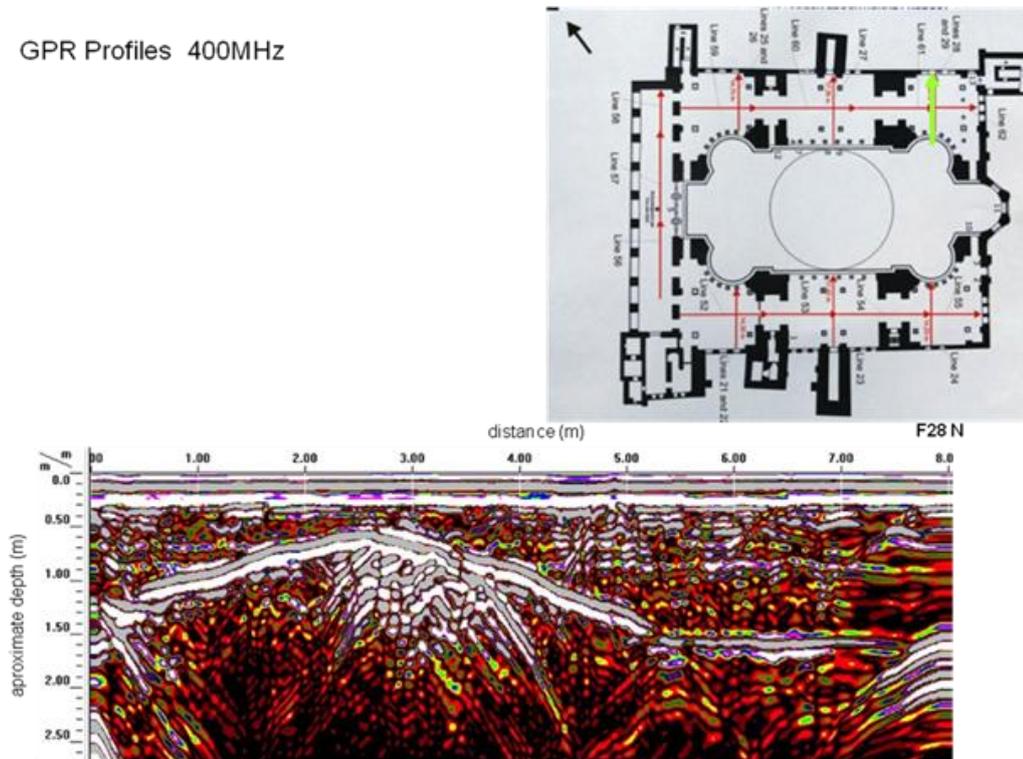


Fig. 5.29. Posizionamento e radargramma della linea 28.

Dall'analisi congiunta di tutti gli archi studiati, le indagini confermano che tre elementi risultano piuttosto deformati, mentre altri tre non presentano sostanziali anomalie di forma. Alla luce di quanto evidenziato, risulta necessario un ulteriore approfondimento diagnostico da integrare ai risultati delle indagini qui riportate per confermare le anomalie osservate ed individuare possibili soluzioni tecniche per la conservazione di tali elementi costruttivi.

Sarà, infine, necessario approfondire come le disomogeneità della superficie pavimentale delle gallerie hanno influenzato le indagini georadar effettuate e quindi i risultati dei radargrammi.

5.4 Risultati dell'indagine Termografica

Le indagini termografiche eseguite in passato su Santa Sofia non sono state frequenti e spesso hanno interessato solo alcune limitate porzioni dell'edificio monumentale. Le prime indagini sono state effettuate nel 2000 e fanno parte di un lavoro che ha riguardato una serie di ispezioni sui materiali strutturali e su alcune delle superfici architettoniche. In particolare, le indagini termografiche hanno riguardato le caratteristiche di assorbimento dell'acqua da parte delle malte campionate. L'impiego dell'indagine termografica è stata utilizzata anche per l'individuazione dei materiali (Avdelidis e Moropoulou, 2004) e dei mosaici (Moropoulou et al., 2013) e per la valutazione degli interventi di conservazione applicati sulla superficie interna della cupola (area nord-est) (Avdelidis et al., 2004). Nel 2002 sono state effettuate altre indagini che hanno interessato parte della semicupola a nord, rilevando molte delle alterazioni superficiali presenti (Cura, 2010).

Nel presente progetto, la tecnica termografica è stata utilizzata per lo studio del distacco delle lastre marmoree utilizzate come rivestimento e come ausilio per la lettura dei processi costruttivi di Santa Sofia. Nel corso degli anni, infatti, non è stato possibile risolvere le questioni relative a dove e con quali materiali sono stati svolti i numerosi interventi di riparazione o ricostruzione. Su Santa Sofia l'indagine termografica ha interessato alcune parti interne del monumento, con particolari approfondimenti per la cupola, l'abside, il narteca e le gallerie.

5.4.1 Indagine del distacco del rivestimento marmoreo

Per indagare il distacco delle lastre marmoree utilizzate come rivestimento dei muri di Santa Sofia è stata utilizzata la termografia per rilevare le differenze di temperatura superficiale tra le parti delle lastre distaccate e quelle non distaccate. Come caso di studio dei distacchi dei rivestimenti marmorei abbiamo esaminato i rivestimenti murari del narteca, in particolare è stata esaminata una superficie di 6.5 m di larghezza e 2 m di altezza.

Dal confronto tra la fotografia e la termografia nella stessa area (Fig. 5.30) si può evidenziare la differenza di temperatura tra il rivestimento superiore e la parte bassa all'attacco con il pavimento. Il colore scuro (blu) deriva da una temperatura bassa generata

dal contatto tra la base delle lastre verticali ed il pavimento maggiormente più freddo ma anche dall'ombra generata dalla luce naturale proveniente dall'alto delle aperture presenti.

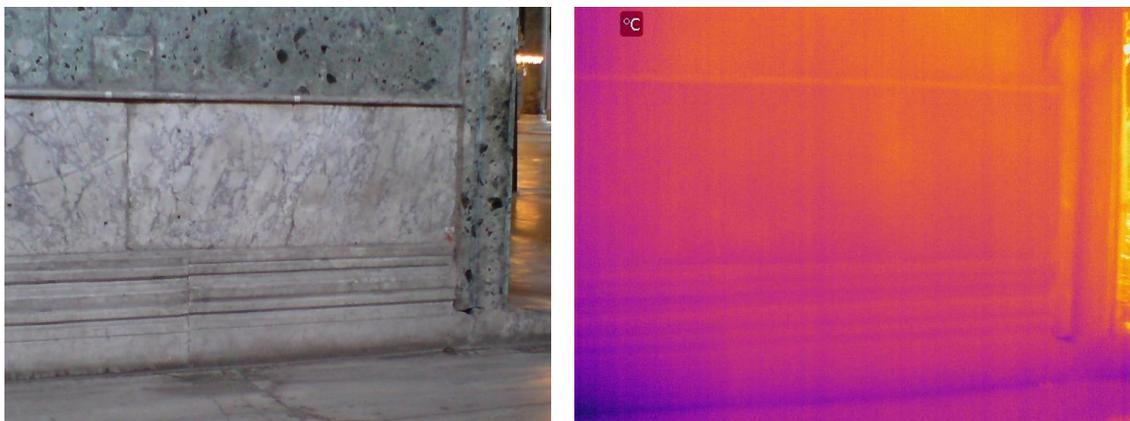


Fig. 5.30. Parte del rivestimento analizzato, immagine (a sinistra) e termogramma (a destra)

Se osserviamo più da vicino una parte del paramento murario studiato (Fig. 5.31) possiamo osservare che le zone chiare (Fig. 5.31) indicano aree con temperatura più alta. Questa può derivare da una separazione delle lastre di marmo dal muro. Le due aree più gialle in Fig. 5.31 sono state rilevate nella zona del marmo verde nella parte alta della foto ed un'altra zona appena sopra la frattura nel marmo bianco. Questo indica che, in tali punti, il marmo non aderisce al muro e quindi le lastre non trasmettono la stessa temperatura sul muro (che è più bassa per l'inerzia termica del paramento stesso).



Fig. 5.31. Particolare del rivestimento analizzato, immagine dell'area (a sinistra) e termogramma (a destra).

Nella parte destra, sotto la frattura, la sistemazione del frammento di marmo risulta efficace poiché le aree ispezionate emettono una temperatura bassa (di colore quasi blu),

come avviene per i paramenti murari ben aderiti al substrato. Nella parte superiore (di colore giallo), invece, il frammento è separato e non aderisce correttamente al substrato, essendo quindi più caldo (Fig. 5.31).

Analizzando un'altra parte del muro, riportata in Fig. 5.32, notiamo che la parte in giallo a destra è una vasta area separata dal substrato del muro. Questa si trova accanto ad una frattura restaurata. Tale dato suggerisce che la lastra di marmo è in parte distaccata dal muro, in prossimità dell'area di contatto con la lastra a destra.

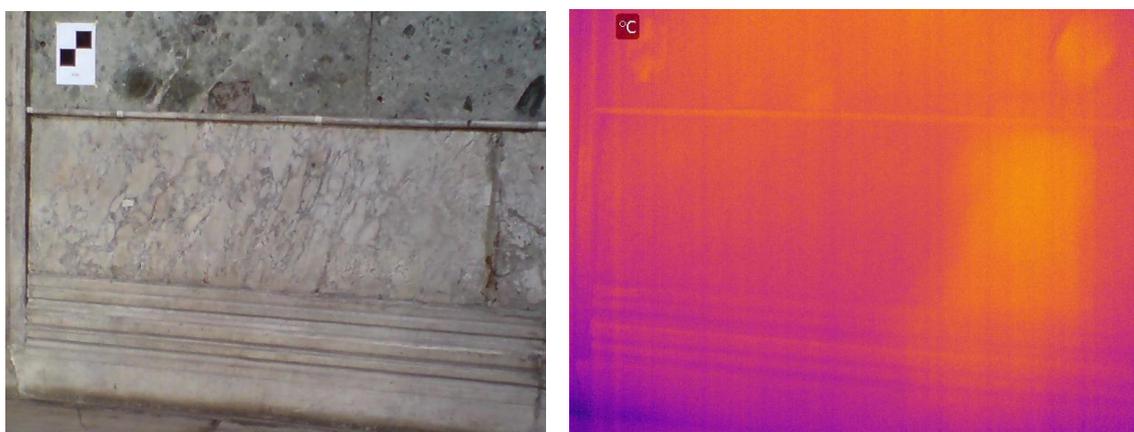


Fig. 5.32. Altro particolare del rivestimento analizzato, immagine (a sinistra) e termogramma (a destra).

5.4.2 Indagine condotta sulla cupola, i pennacchi e i tympana

La seconda parte dell'indagine termografica ha avuto come scopo quello di individuare le possibili anomalie del tessuto costruttivo cui fanno riferimento i testi in letteratura, individuando le varie discontinuità tra i materiali presenti nell'edificio e consentendo di rilevare l'esatta ubicazione delle varie stratificazioni costruttive. L'indagine ha riguardato i pennacchi della cupola, gli archi ubicati in corrispondenza dell'abside e dell'ingresso principale, i *tympana* e gli archi secondari.

Secondo Mainstone (2009), i materiali con cui sono stati edificati i pennacchi sono delle murature di mattoni di laterizio dello spessore di 40 mm circa, intervallati con una matrice di malta, composta da calce e sabbia, con uno spessore superiore a quello dei laterizi (50-60 mm). La presenza di uno spessore di malta maggiore di quello del laterizio è da ricercarsi nella necessità di dover realizzare una curvatura dei pennacchi che rispettasse le

linee geometriche della sfera di progetto. Le ispezioni termografiche hanno dimostrato la presenza di materiali diversi per tipologia e dimensioni. Tutti e quattro i pennacchi presenti sono stati ispezionati e sono state rilevate alcune sostanziali differenze tra di loro, testimonianza delle varie metodologie costruttive del passato.

Il pennacchio ubicato a sud-est (Fig. 5.33) mostra un insieme di materiali organizzato con particolare regolarità e con la presenza ordinata di ricorsi di materiale con diverse caratteristiche termiche. La continuità materica e tipologica rilevata dimostra la volontà di rendere maggiormente ammortati i pennacchi e gli archi sopra i *tympana* rendendo tali elementi maggiormente resistenti alle sollecitazioni.

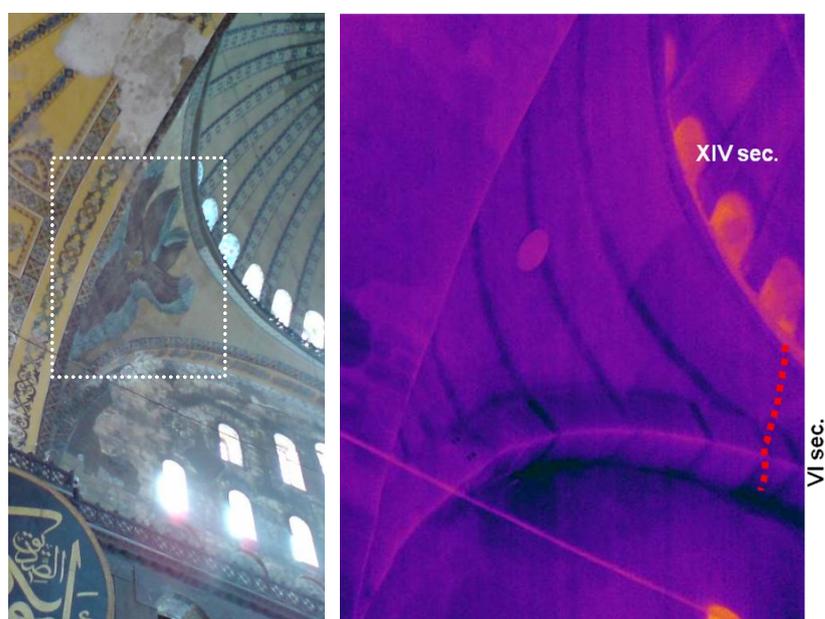


Fig. 5.33. Foto ed immagine termica del pennacchio sud-est dall'abside (Cappa et al., in press, modificato).

La scelta costruttiva di posare tali ricorsi orizzontali sostanzialmente equidistanti è associata a quella di prolungarli fino a raccordarsi nell'arco principale a sud. Il numero di ricorsi distinguibili nell'analisi termica risultano cinque (di cui quattro dei quali corrispondenti a quelli dell'arco principale a sud). Lo spessore di tali ricorsi appare sostanzialmente di uguali dimensioni. Tale tipologia muraria risulta essere probabilmente la testimonianza dell'intervento di Astras e Peralta avvenuto nel XIV secolo a seguito dei danni causati dal sisma del 1343.

Ubicato a destra dell'abside, guardando verso l'ingresso dal nartece, il pennacchio a nord-est (Fig. 5.34) è quello in cui risulta particolarmente evidente, già ad occhio nudo, una

distorsione geometrica, testimonianza di un congiungimento tra due parti non contemporanee. Difatti la cuspide dimostra un difficile tentativo di raccordo tra parti riedificate in epoche diverse. L'area confinante ad est presenta una porzione di muratura con i medesimi ricorsi rilevati nel pennacchio sud-est.

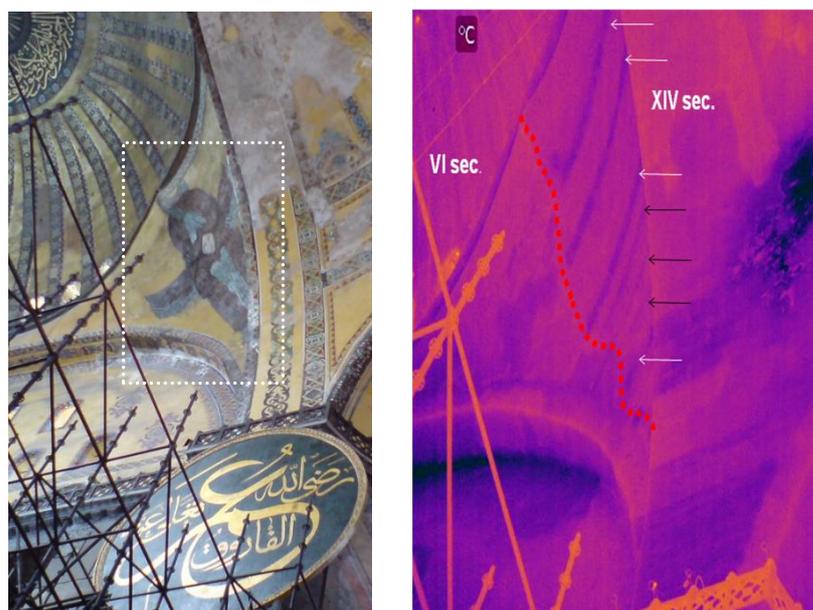


Fig. 5.34. Foto ed immagine termica del pennacchio nord-est dall'abside (Cappa et al., in press, modificato).

Anche in questo caso si evidenzia la presenza di un materiale diverso utilizzato nuovamente come intervallo costruttivo. E' rilevabile anche una striscia verticale di colore più chiaro (Fig. 5.34, parte tratteggiata in rosso), testimonianza del punto di congiunzione tra le due strutture murarie ma anche di interruzione dei ricorsi orizzontali della parte ad est del pennacchio. Nella parte a nord invece non si rileva la stessa tipologia costruttiva, bensì un materiale con numerose e disordinate eterogeneità. Qui non risultano di facile interpretazione gli interventi eseguiti nel X secolo a cui Mainstone fa riferimento (Mainstone, 2009). Il numero di ricorsi, chiaramente individuabili nella porzione ad est, risultano pari a 4. Quelli inferiori si integrano in più punti alle parti adiacenti ma disperdono la loro regolarità. In questo caso, pur rilevando uno spessore dei ricorsi simile al pennacchio precedente, non si nota una sostanziale equidistanza tra gli stessi. Né tanto meno risultano delle corrispondenze tra i ricorsi della parte ad est con l'arco adiacente. Per il pennacchio ubicato a nord-ovest (Fig. 5.35) si rilevano nuovamente dei ricorsi di materiale diverso ma, rispetto ai casi precedenti, il numero dei ricorsi si limita a due.

All'estremità della parte confinante con il *tympana* a nord si rileva una discontinuità del ricorso superiore (Fig. 5.35) che potrebbe dimostrare il confine tra la parte del VI secolo e quella del X secolo. Lo spessore di tali elementi appare meno costante e minore dei precedenti, causa di un probabile utilizzo di elementi di diversa dimensione.

L'arco superiore del *tympana* a nord, confinante con il pennacchio, non presenta alcun ricorso e quindi non si evidenziano corrispondenze significative tra tali elementi. Per l'arco ad ovest, pur essendo presenti ricorsi di materiale diverso, gli stessi non risultano edificati con lo stesso ordine costruttivo del pennacchio a sud-est ed inoltre lo spessore di tali ricorsi appare di molto inferiore rispetto a quelli del pennacchio adiacente. Tutto il resto del materiale utilizzato appare di sostanziale omogeneità termica.



Fig. 5.35. Foto ed immagine termica del pennacchio nord-ovest dal centro della navata (Cappa et al., in press, modificato).

Il pennacchio a sud-ovest (Fig. 5.36), oggetto di un più recente restauro delle superfici decorative, presenta delle ulteriori singolarità che lo differenziano da tutti gli altri. In particolare sono presenti tre aree distinguibili. La prima ubicata superiormente, a margine del *tympana* a sud (Fig. 5.36, punto 1) non presenta ricorsi ed appare omogenea nella sua composizione materica. Sono presenti, rispetto agli altri casi, dei fori visibili anche ad occhio nudo che attraversano solo lo spessore del pennacchio. Essendo di colore più scuro, quindi più freddo, tali cavità attraversano lo spessore murario del pennacchio senza però attraversare il muro perimetrale che lo delimita dall'esterno. La parte inferiore di tale area

(Fig. 5.36, punto 2) presenta invece 4 ricorsi di ampio spessore, in gran parte equidistanti, che si interrompono quasi a metà altezza con un andamento concavo.

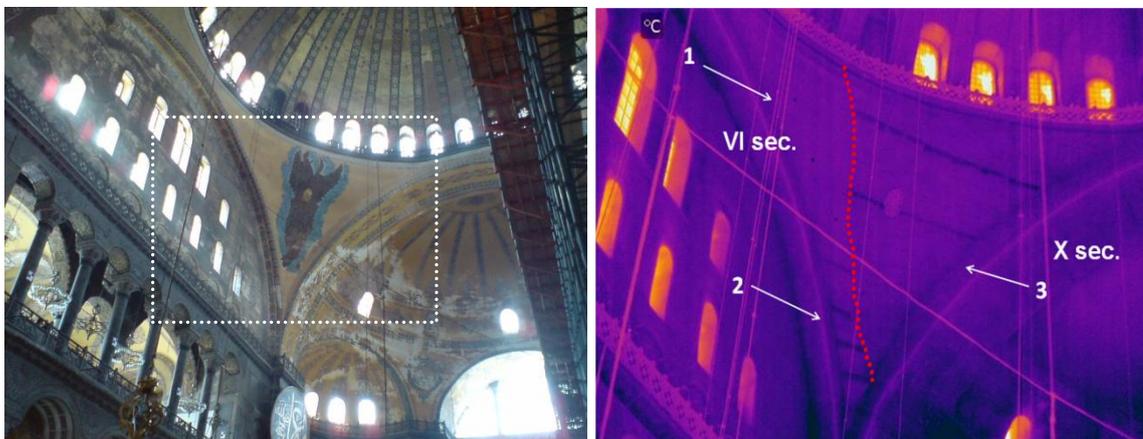


Fig. 5.36. Foto ed immagine termica del pennacchio sud-ovest dal centro della navata, con indicazione delle tre aree in cui si evidenziano sostanziali differenze costruttive (Cappa et al., in press, modificato).

La parte adiacente all'arco ad ovest (Fig. 5.36, punto 3) appare simile al pennacchio a nord-ovest. Difatti sono presenti due soli ricorsi con spessori non regolari causati, anche in questo caso, dall'utilizzo di materiali simili ma di diverso spessore. Si rileva altresì un'ulteriore singolarità, frutto di un errato sviluppo altimetrico del ricorso. Difatti quest'ultimo non risulta parallelo alla linea di imposta della cupola bensì possiede una inclinazione verso l'arco ad ovest. Tale riscontro è possibile rilevarlo, seppur con minore entità, anche per il pennacchio ubicato a nord-ovest. Gli archi adiacenti ad ovest e sopra il *tympana* a sud, pur presentando sporadici ricorsi, non presentano invece corrispondenze e spessori così netti come nel precedente pennacchio.

Gli archi, ubicati in corrispondenza dell'abside e dell'ingresso principale (Fig. 5.37, lettera C), rappresentano elementi architettonici che hanno subito vari interventi di ricostruzione. Difatti si rileva che l'arco ad ovest (Fig. 5.35) presenta dei sottili ricorsi di materiale diverso ubicati in modo quasi equidistante. Gli stessi ricorsi non risultano però collegati a quelli dei pennacchi adiacenti. Inoltre lo spessore di tali elementi appare più sottile di quelli impiegati nei pennacchi. Sono altresì visibili, nella porzione centrale dell'arco ad est, tre ricorsi, ubicati nel lato frontale dello stesso, forse frutto di un tentativo di infittire i ricorsi in prossimità della parte di chiave dell'arco.

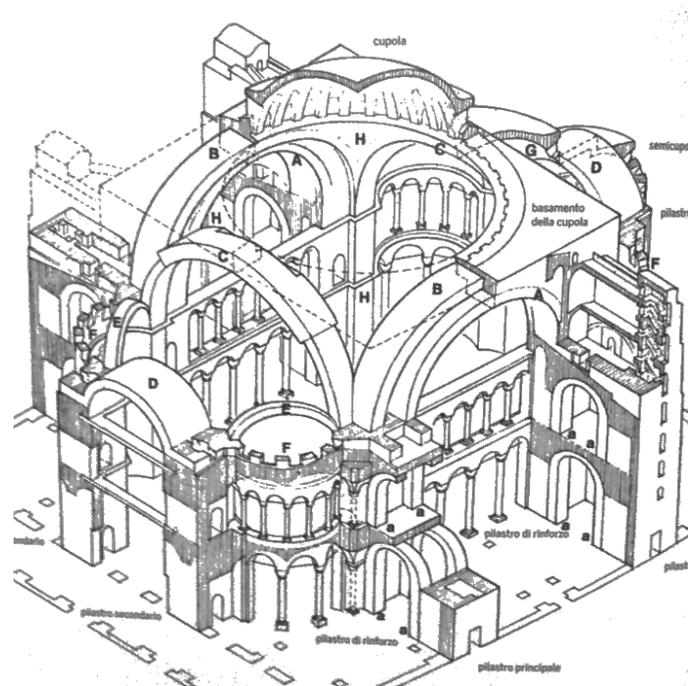


Fig. 5.37. Sistema costruttivo primario e secondario dell'edificio (da Mainstone, 2009).

L'arco ad est, che delimita la navata centrale e l'abside, è quello di più recente riedificazione. L'ispezione ha confermato le stesse evidenze dell'arco ad ovest. Nella parte bassa dell'arco, sia per il lato a nord che per quello a sud, si possono intravedere dei blocchi di materiale con larghezze diverse (Figs. 5.33 e 5.34). Tale materiale, considerato che, nell'immagine termica dei pennacchi a nord est e sud est (Figs. 5.33 e 5.34) presenta simili parametri termici, è identificabile come blocchi di pietra squadrata.

Gli archi principali ubicati a nord e sud (Fig. 5.37, lettera A) appartengono, solo in parte, ad un'epoca più remota rispetto agli altri archi principali. Difatti la loro riedificazione risulta attribuibile al IV secolo (Mainstone, 2009).

L'arco ubicato a sud è quello in cui risultano più evidenti gli interventi di ricostruzione che hanno interessato le porzioni a confine con il pennacchio ad est. In particolare si rileva l'estensione della tecnica dei ricorsi fino a raccordarli con lo stesso arco. Gli stessi difatti terminano solo in corrispondenza dell'ultimo ricorso del pennacchio ad est. La porzione dell'arco centrale e quella ad ovest, non presentano invece evidenti caratteri di disomogeneità. Appaiono difatti composte con il medesimo materiale fino al raccordo con il pilastro sottostante ad ovest. Quest'ultima porzione, considerata l'omogeneità termica, potrebbe essere quella più antica e quindi attribuibile al IV secolo.

L'arco principale a nord non presenta alcuna evidente disomogeneità termica. Solo in alcuni punti a confine con il pennacchio a nord ovest si rilevano degli sporadici ricorsi (Fig. 5.35) che però appaiono con uno spessore ridotto rispetto a quelli evidenziati nell'arco principale a sud. Il resto dell'arco si presenta con lo stesso materiale costruttivo e, solo nella parte inferiore, in corrispondenza del pennacchio a nord est, sono presenti strati superficiali di materiale diverso rispetto a quello impiegato per il resto dell'arco (Fig. 5.35). Anche gran parte di questo arco, per la sua omogeneità, risulta appartenere al periodo più antico di ricostruzione (IV secolo).

In Fig. 5.38 è riportata la ricostruzione dell'intera cupola con le diverse fasi costruttive, ottenuta mediante mosaica tura delle immagini termiche. In figura è possibile notare che l'arco ad ovest mostra sottili ricorsi di materiali diversi, quasi equidistanti (Fig. 5.38, punto m). Tuttavia, queste linee non sono collegate a quelle dei pennacchi adiacenti e sono molto più sottili. L'arco principale nella parte nord, invece non ha evidenti disomogeneità termiche. Solo in determinati punti del confine con il pennacchio nord-ovest, è possibile osservare alcune linee sporadiche (Fig. 5.38, punto n) con uno spessore ridotto rispetto alle linee dell'arco principale sud.

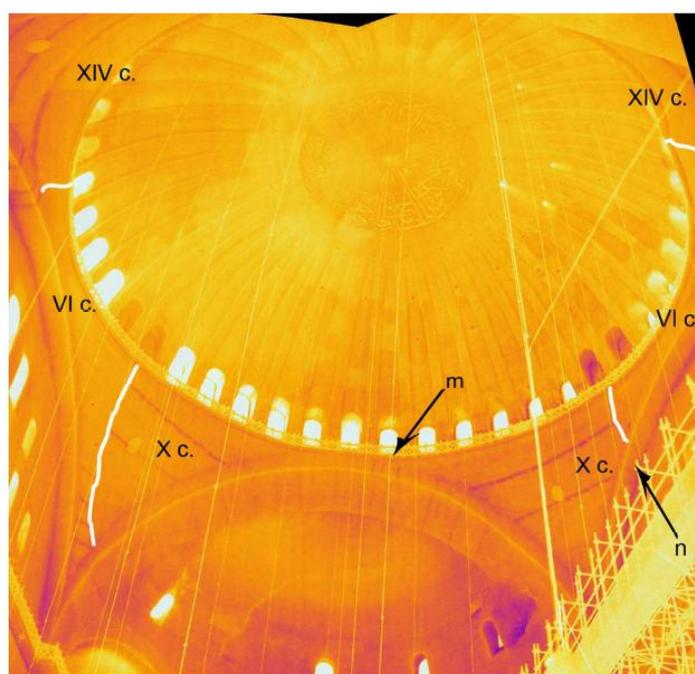


Fig. 5.38. Mosaico di immagini termiche dell'arco principale, del timpano, dei pennacchi e della cupola con fasi costruttive (Cappa et al., in press).

Per quanto riguarda i *tympana*, i materiali con cui sono stati realizzati sono laterizi. Dall'indagine termografica è stato possibile rilevare molte informazioni sulla loro composizione materica. Nel *tympana* a nord (Fig. 5.39) è stato possibile distinguere l'altezza e le caratteristiche dell'arco secondario. E' difatti visibile una striscia molto ampia, di diversa temperatura, ubicata in sommità (Fig. 5.39, punto 1). Inoltre è stato possibile individuare la presenza dell'intervento di restringimento delle finestre (Fig. 5.39, in giallo). Dal confronto tra i risultati della termografia e le fonti storiche di Mainstone (2009) si può ipotizzare che tale intervento si riferisca a quello diretto dall'arch. Sinan.

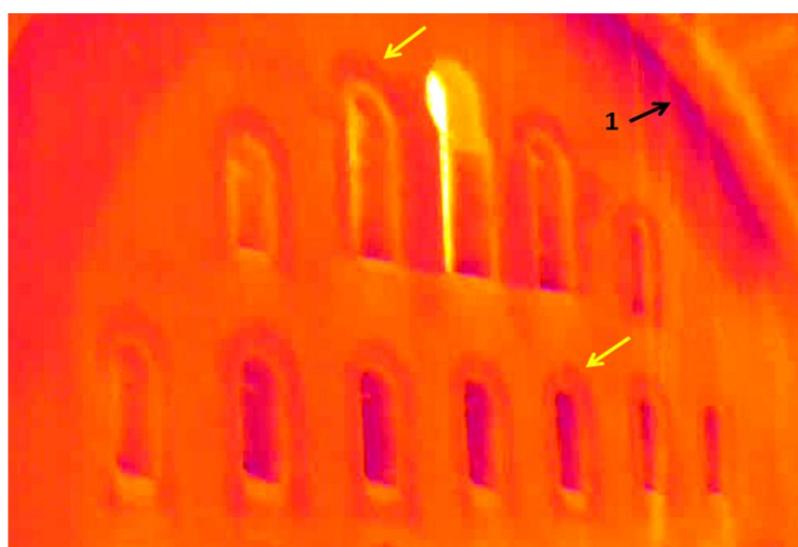


Fig. 5.39. Snapshot del tympana nord acquisita dal video termico.

Il materiale aggiunto per tale restringimento ha fatto registrare valori di temperatura più bassi dall'intorno. Per cui gli stessi potrebbero essere attribuiti ad un materiale diverso dal resto del paramento murario.

Nel *tympana* a sud (Fig. 5.40) sono state rilevate sostanzialmente le medesime evidenze. Difatti, sono riscontrabili sia l'arco di delimitazione del *tympana* sia il restringimento delle finestre. La qualità dell'immagine rilevata, considerando la diversa esposizione della parete rispetto alla precedente, non permette di scorgere, con la stessa nitidezza, le parti di diverso materiale. Le stesse porzioni risultano visibili nelle ultime aperture a destra dell'immagine e, per l'arco secondario, a sinistra dell'immagine (Fig. 5.40).

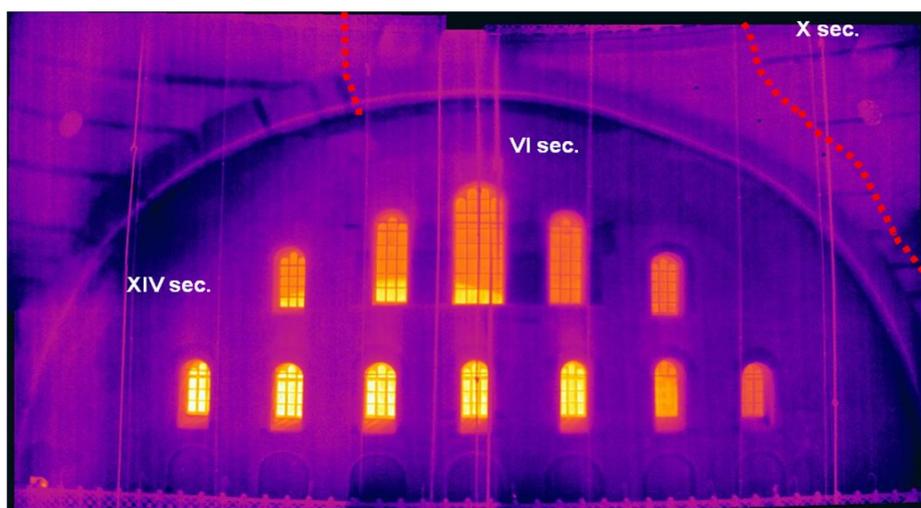


Fig. 5.40. Mosaicatura termica del tympana sud (Cappa et al., in pres, modificato).

5.5 Risultati dell'indagine mediante Endoscopia

L'indagine endoscopica svolta durante la campagna diagnostica del 2013 ha riguardato sostanzialmente il nartece ed una navata laterale. L'indagine è stata utilizzata per integrare le informazioni riguardo ai distacchi tra le lastre marmoree ed il muro. Mediante questa tecnica sono stati evidenziati importanti fenomeni di distacco tra i rivestimenti marmorei ed il substrato del muro (Fig. 5.41).

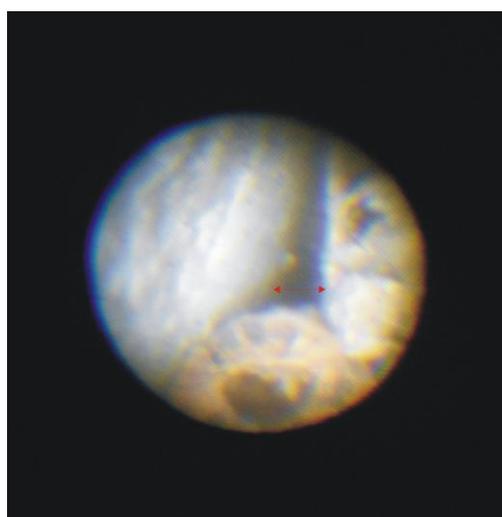


Fig. 5.41. Immagine endoscopica ottenuta durante la campagna diagnostica del 2013.

5.6 Risultati dell'analisi composizionale delle malte

Santa Sofia in Istanbul è uno dei monumenti architettonici più grandi e più complessi del mondo antico. Probabilmente uno dei segreti della sua longevità è contenuto nella composizione delle sue malte di allettamento. Le malte sono presenti abbondantemente nella struttura muraria e in molti casi lo spessore delle malte di allettamento è circa il doppio dei laterizi stessi. Nonostante la sua importanza, gli studi precedenti che hanno riguardato le malte di Santa Sofia non sono moltissimi e hanno interessato pochi campioni. Nel lavoro di Çakmak et al. (1995) sono stati studiati 7 campioni di malta di allettamento provenienti dalla cupola e dall'arco principale. Çakmak et al. (1995) riportano analisi chimiche molto datate di tali malte, riprese da vecchi "appunti" di Van Nice, in cui si utilizza un linguaggio basato sulla definizione chimica di cementi moderni secondo Taylor (1964). In seguito Moropoulou et al. (2002) pubblicano l'analisi composizionale di 8 malte prelevate dalla nervatura della cupola, dall'arco ovest, dai contrafforti a nord-ovest, dall'arco principale a nord e dalla rastremazione sud orientale. Questi studi hanno evidenziato che, molto probabilmente, la grande longevità di Santa Sofia è dovuta alla composizione del legante delle malte, che mostra proprietà idrauliche, derivanti dall'uso delle materie prime utilizzate per la loro produzione. Si è ipotizzato, infatti, che le proprietà idrauliche possano derivare dall'uso di calcari marnosi ricchi in idrauliti (Si, Al, Fe), usati per la produzione della calce. Ciò conferirebbe al legante proprietà idrauliche naturali. In aggiunta, nelle malte di Santa Sofia è sempre presente il cocchiopesto (ceramiche e laterizi frantumati) che, reagendo con il legante, darebbe ad esso maggiori proprietà idrauliche, favorendo la formazioni di fasi C-S-H sotto forma di gel, quindi fasi a bassissima cristallinità. Tali malte, secondo gli autori, avrebbero le caratteristiche fisiche di malte moderne ad alta resistenza comparabile con quella delle malte cementizie (Moropoulou et al. 2002; 2006).

Lo scopo di questo lavoro è quello di fornire nuovi dati sulla composizione delle malte di Santa Sofia, relativamente ad altre strutture murarie mai indagate da precedenti studi. A tale proposito sono state campionate 20 malte di allettamento, la cui ubicazione e la datazione preliminare, derivante da studi precedenti di tipo storico-architettonico (Mainstone 2009), è riportata nel capitolo 3. Le malte sono state studiate mediante microscopia ottica a luce polarizzata trasmessa (OM), microscopia elettronica a scansione

(SEM-EDS), diffrattometria a raggi X su polveri (XRPD), spettroscopia a fluorescenza di Raggi X (XRF) e microscopia elettronica a trasmissione (TEM).

5.6.1 Studio petrografico delle malte e fasi costruttive

Le 20 malte di allestimento campionate non mostrano particolari differenze dal punto di vista macroscopico. Si tratta in tutti i casi di malte in cui è possibile evidenziare, mediante la sola osservazione visiva, la presenza di frammenti di cocciopesto (ceramiche e laterizi frantumati). Questi presentano dimensioni inferiori al mm e conferiscono alle malte una colorazione rosata. Le uniche differenze osservabili dal punto di vista macroscopico riguardano prevalentemente le dimensioni granulometriche del cocciopesto e la sua abbondanza relativa. In Fig. 5.42 è possibile osservare il caratteristico aspetto macroscopico di due malte dal tipico colore rosato, in cui le dimensioni medie del cocciopesto sono nettamente diverse. Il campione MAS20 (Fig. 5.42 b) ha infatti un aggregato con dimensioni medie di circa 3.9 mm; mentre il campione MAS8 (Fig. 5.42 a) ha un aggregato con dimensioni medie di circa 1.6 mm.

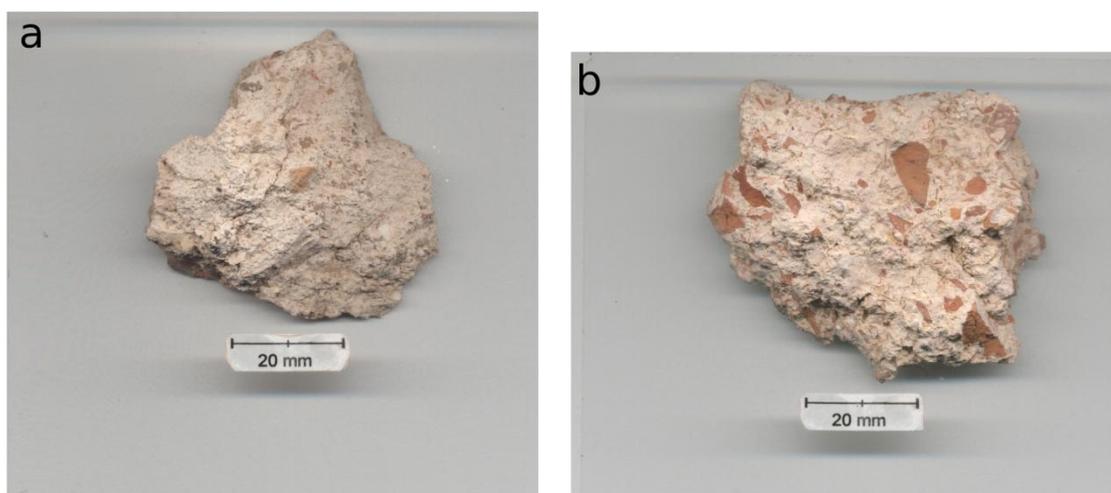


Fig. 5.42. a) Foto macroscopica del campione MAS8. **b)** Foto macroscopica del campione MAS20.

Lo studio dei campioni in sezione sottile mediante il microscopio ottico polarizzatore permette, comunque, di fornire maggiori informazioni sulla loro composizione mineralogico-petrografica, consentendo di evidenziare altre differenze.

L'analisi composizionale delle malte, come già discusso nel capitolo 3, può dare utilissime indicazioni sull'esistenza di differenti fasi costruttive. Per evidenziare analogie e differenze tra le malte di allettamento, molto spesso, si combinano le osservazioni geochimiche con quelle petrografiche (De Luca et al., 2015; Miriello et al., 2015). Queste osservazioni, nella maggior parte dei casi, concordano bene quando nelle malte non è presente abbondante cocchiopesto. Le malte di Santa Sofia, rispetto ad altri tipi di malte, presentano una difficoltà aggiuntiva; sono tutte malte contenenti rilevanti quantità di cocchiopesto. In quasi tutte le malte sono presenti frammenti di cocchiopesto che possono superare i 6 mm circa (Tab. 5.1). In alcune sono presenti anche frammenti con dimensioni massime di 2 cm circa. In questi casi diventa fondamentale lo studio petrografico in sezione sottile, poiché il solo studio geochimico potrebbe evidenziare delle analogie chimiche poco corrispondenti alla reale appartenenza delle malte alla stessa fase costruttiva; basterebbe un solo frammento di cocchiopesto di dimensioni centimetriche, presente in un campione ed assente in un altro, a rendere due malte, ottenute da uno stesso impasto, geochimicamente differenti.

I campioni studiati hanno dimensioni medie dell'aggregato variabili all'interno di un intervallo granulometrico ristretto (Tab. 5.1): si passa da circa 1 mm per il campione MAS2 (*very coarse sand* secondo Wentworth, 1922), a circa 3.9 mm per il campione MAS22 (*granule* secondo Wentworth, 1922). Le stime medie sono state eseguite in modo semi-quantitativo, attraverso le osservazioni microscopiche. In Fig. 5.43 è rappresentata la distribuzione delle dimensioni medie dell'aggregato nei vari campioni. La maggior parte delle malte ha un aggregato variabile da moderatamente ben classato a moderatamente classato (Tab. 5.1); soltanto 4 campioni hanno un aggregato ben classato (Tab. 5.1). Le stime volumetriche di aggregato, legante e porosità ($d > 1/16$ mm) sono state eseguite utilizzando le tavole di comparazione visuale (Ricci Lucchi 1980; Myron Best 2003); di conseguenza anche tali valori devono essere considerati di tipo semi-quantitativo. In Fig. 5.44 è mostrata la distribuzione del rapporto aggregato/legante nei vari campioni. Come chiaramente osservabile nella Tab. 5.1 e in Fig. 5.44, i rapporti aggregato/legante, eccetto per il campione MAS24, sono tutti inferiori ad 1. Ciò implica la prevalenza del legante rispetto alla frazione aggregata.

Questo dato è molto interessante, poiché tali rapporti si allontanano da quella che dovrebbe essere la tradizione tecnologica romana riportata nel "De Architectura di Vitruvio". Nel testo vitruviano, infatti, si parla di malte preparate mescolando 2 o 3 parti di aggregato e

una parte di legante. Non è la prima volta che lo studio composizionale di malte antiche fa emergere differenze tra quanto riportato dai testi antichi e quanto misurato nella realtà (De Luca et al., 2015).

Dimensione media dell'aggregato (micron)	Dimensione massima dell'aggregato (mm)	Classazione (Boggs, 2010; Jerram 2001)	Wentworth size (Wentworth, 1922)	% Aggregato mediante tavole comparative (Ricci Lucchi 1980; Myron Best 2003)	% Macroporosità mediante tavole comparative (Ricci Lucchi 1980; Myron Best 2003)	% Legante mediante tavole comparative (Ricci Lucchi 1980; Myron Best 2003)	Fasi mineralogiche stimate mediante OM e XRD	Frammenti di roccia	% Frammenti ceramici stimati mediante analisi d'immagine	Altro
1090	6.35	M.W.S.	Very coarse sand	22	10	68	Cal, Qtz, Pl, Bt, Ms, Or, Om	Frammenti granitici, quarziti e calcari microcristallini (tracce)	20	Bioclasti (tracce)
1590	10.23	M.W.S.	Very coarse sand	40	10	50	Qtz, Cal, Pl, Or, Om, Ms e Bt (tracce), Hem (tracce)	Frammenti granitici, quarzite, calcare criptocristallino (tracce)	18	Bioclasti (tracce)
1200	6.29	M.W.S.	Very coarse sand	40	10	50	Qtz, Cal, Pl, Or, Om, Ms and Bt (tracce), Hem (tracce)	Frammenti granitici, quarzite, calcare criptocristallino (tracce)	16	Bioclasti (tracce)
2190	9.16	M.S.	Granule	37	15	48	Cal, Qtz, Pl, Or, Om, Ms e Bt (tracce), Hem (tracce), Di (tracce)	Frammenti granitici (tracce)	37	
1930	17.50	M.S.	Very coarse sand	40	10	50	Qtz, Cal, Pl, Or, Om, Ms e Bt (tracce)	Frammenti granitici, quarzite	31	Bioclasti (tracce)
3826	9.76	W.S.	Granule	36	15	49	Cal, Qtz, Pl, Or, Om, Di (tracce), Bt e Ms (tracce), Hem (tracce)	Frammenti granitici e quarzite (tracce)	34	
3900	12.00	M.W.S.	Granule	30	7	63	Cal, Qtz, Pl, Or, Om, Di (tracce), Bt e Ms (tracce), Hem (tracce)	Frammenti granitici e quarzite (tracce)	29	
2950	7.33	W.S.	Granule	47	15	38	Cal, Qtz, Pl, Or, Om, Di (tracce), Bt e Ms (tracce), Hem (tracce)	Frammenti granitici (tracce)	47	
1500	6.78	M.W.S.	Very coarse sand	27	10	63	Qtz, Cal, Pl, Or, Om, Hem (tracce)	Frammenti granitici (tracce)	28	Tracce di carbone
2000	10.50	W.S.	Very coarse sand	40	10	50	Qtz, Cal, Pl, Or, Om, Ms e Bt (tracce)	Frammenti granitici, quarzite, calcare criptocristallino	15	
1950	5.49	M.W.S.	Very coarse sand	32	10	58	Cal, Qtz, Pl, Or, Om, Hem (tracce), Di (tracce), Ms e Bt (tracce)	Frammenti granitici (tracce)	30	
1760	10.5	M.W.S.	Very coarse sand	40	10	50	Qtz, Cal, Pl, Or, Om, Ms e Bt (tracce), Hem (tracce)	Frammenti granitici, quarziti, calcari criptocristallini	15	
2325	9.48	W.S.	Granule	43	10	47	Qtz, Cal, Pl, Or, Om, Di, Hem, Ms e Bt (tracce)	Frammenti granitici e quarzite (tracce)	43	
2090	8.69	M.S.	Granule	40	10	50	Qtz, Cal, Pl, Or, Om, Bt e Ms (tracce)	Frammenti granitici, quarziti, calcare micro e criptocristallino	7	Bioclasti (tracce)
3050	28.00	M.S.	Granule	35	20	45	Qtz, Cal, Or, Pl, Om, Bt e Ms (tracce)	Frammenti granitici, quarziti	15	
1500	15.00	M.S.	Very coarse sand	25	10	65	Qtz, Cal, Pl, Or, Om, Bt e Ms (tracce)	Frammenti granitici, quarziti	non eseguita. Campione troppo piccolo	
2100	8.00	M.S.	Granule	30	6	64	Qtz, Cal, Or, Pl, Om, Bt e Ms (tracce)	Frammenti granitici, quarziti	12	
2000	20.00	M.S.	Very coarse sand	30	5	65	Qtz, Cal, Or, Pl, Om, Bt e Ms (tracce)	Frammenti granitici, quarziti	12	
2600	5.00	M.W.S.	Granule	30	5	65	Qtz, Cal, Or, Pl, Om, Bt e Ms (tracce)	Frammenti granitici, quarziti, calcare micro e criptocristallino	5	Bioclasti (tracce)
2600	14.00	M.W.S.	Granule	38	5	57	Qtz, Cal, Or, Pl, Om, Bt e Ms (tracce)	Frammenti granitici, quarziti, calcare criptocristallino	12	

Tab. 5.1. Descrizione delle caratteristiche petrografiche dei campioni in sezione sottile [Classazione: M.S.: moderately sorted; M.S.: moderately sorted; M.W.S.: moderately well sorted, W.S.: well sorted - Fasi mineralogiche: Bt: biotite, Cal: calcite, Di: diopside, Hem: ematite; Om: minerali opachi, Or: ortoclasio, Pl: plagioclasio, Qzt: quarzo].

L'analisi mineralogica delle malte, eseguita mediante diffrattometria a raggi X (XRPD), non fa emergere differenze significative tra i vari campioni (Tab. 5.2). I minerali che costituiscono le malte sono sempre quarzo, calcite, plagioclasio, ortoclasio, miche e in alcuni casi diopside ed ematite. Il primo dovuto alla presenza di frammenti ceramici nell'aggregato, con all'interno diopside di neoformazione; la seconda è imputabile alla

presenza di ematite nel cocchiopesto, dovuta alla deidratazione degli idrossidi di ferro (Goethite) ed alla conseguente formazione di ematite che avviene al di sopra dei 275 °C durante il processo di cottura dei materiali ceramici.

	<i>Max.<----->Min.</i>					
MAS2	Cal	Qtz	Pl	Mc		
MAS8	Qtz	Cal	Pl	Or	Hem	
MAS9	Qtz	Cal	Pl	Or	Hem	
MAS14	Cal	Qtz	Pl	Or	Hem	Di
MAS17	Qtz	Cal	Pl	Or		
MAS20	Cal	Qtz	Pl	Or	Di	Hem
MAS22	Cal	Qtz	Pl	Or	Di	Hem
MAS24	Cal	Qtz	Pl	Or	Di	Hem
MAS29	Qtz	Cal	Pl	Or	Hem	
MAS33	Qtz	Cal	Pl	Or		
MAS34	Cal	Qtz	Pl	Or	Hem	Di
MAS38	Qtz	Cal	Pl	Or	Hem	
MAS42	Cal	Qtz	Pl	Or	Di	Hem
MAS44	Qtz	Cal	Pl	Or		
MAS47	Qtz	Cal	Or	Pl		
MAS48	Qtz	Cal	Pl	Or		
MAS49	Qtz	Cal	Or	Pl		
MAS50	Qtz	Cal	Pl	Or	Mc	
MAS54	Qtz	Cal	Or	Pl		
MAS56	Qtz	Cal	Pl	Or		

Tab. 5.2. Composizione mineralogica semi-quantitativa dei campioni, in ordine decrescente, mediante analisi XRPD. Cal: calcite; Qtz: quarzo, Pl: plagioclasio; Or: ortoclasio; Mc: miche; Di: diopside; Hem: ematite.

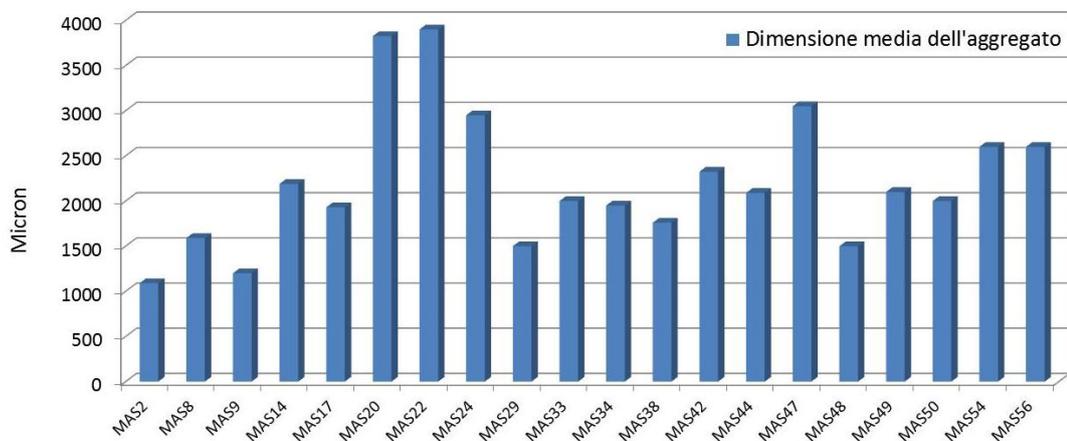


Fig. 5.43. Stima semi-quantitativa della distribuzione delle dimensioni medie dell'aggregato nei campioni di malta.

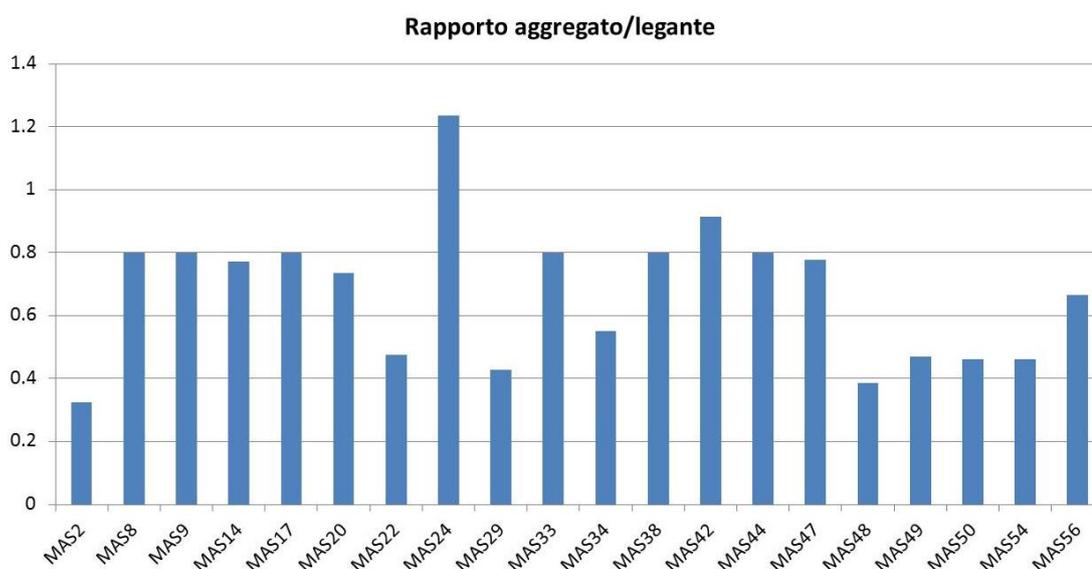


Fig. 5.44. Distribuzione semi-quantitativa del rapporto aggregato/legante nei campioni di malta.

È possibile far emergere le analogie e le differenze delle malte su base chimica utilizzando la cluster analysis e verificando se esiste una buona corrispondenza tra le ipotesi storiche e la reale analogia composizionale delle malte. Teoricamente, quello che ci dovremmo aspettare è che le malte realizzate nella stessa fase costruttiva mostrino le stesse caratteristiche chimiche e che quindi cadano all'interno dello stesso gruppo (cluster). In Fig. 5.45a è rappresentato il dendrogramma ottenuto facendo la cluster analysis, dopo aver trasformato i dati in clr (centred log ratio) secondo il modello di Aitchison (1986), utilizzando simultaneamente tutti gli elementi maggiori, eccetto P_2O_5 e H_2O (Tab. 5.3). La cluster analysis evidenzia 4 gruppi significativi di malte, ciascuno dei quali, teoricamente, dovrebbe raggruppare malte realizzate nello stesso momento costruttivo. In Fig. 5.45b sono rappresentate le stesse malte, raggruppate secondo i simboli ed i raggruppamenti identificati dalla cluster analysis, considerando le sole variabili Fe_2O_3 vs SiO_2 trasformate in clr (Aitchison 1986). Gli elementi in tracce (Tab. 5.4) non sono stati usati per effettuare la cluster analysis, poiché differenze significative tra due campioni in alcuni elementi in tracce potrebbero non corrispondere necessariamente a due fasi costruttive diverse (Miriello et al., 2015).

	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	LOI	Sum
MAS2	25.36	0.48	6.20	3.94	0.08	2.31	31.76	0.70	1.24	0.20	27.72	100.00
MAS8	44.92	0.49	8.58	4.61	0.11	2.69	19.97	0.85	2.16	0.10	15.52	100.00
MAS9	43.00	0.38	6.66	3.57	0.08	3.28	21.80	0.88	2.00	0.07	18.28	100.00
MAS14	34.07	0.57	8.15	5.62	0.13	3.17	27.21	0.60	1.48	0.17	18.83	100.00
MAS17	52.79	0.31	7.18	2.87	0.06	1.94	17.04	0.91	2.62	0.06	14.22	100.00
MAS20	34.19	0.57	9.20	5.76	0.13	3.18	29.25	1.12	1.95	0.11	14.56	100.00
MAS22	31.92	0.52	8.24	5.30	0.14	3.55	37.23	1.02	1.87	0.11	10.10	100.00
MAS24	32.46	0.53	8.93	5.28	0.12	3.23	22.05	0.78	1.66	0.09	24.88	100.00
MAS29	36.03	0.59	8.04	5.04	0.11	2.52	25.80	0.58	1.49	0.25	19.56	100.00
MAS33	49.84	0.22	5.34	1.94	0.06	1.56	16.85	0.75	2.34	0.05	21.05	100.00
MAS34	35.77	0.59	8.37	5.67	0.13	3.32	29.28	0.72	1.66	0.15	14.33	100.00
MAS38	50.28	0.34	7.34	3.16	0.06	1.92	17.52	2.14	3.10	0.06	14.06	100.00
MAS42	37.88	0.61	9.28	5.98	0.14	3.58	23.52	0.65	1.63	0.11	16.61	100.00
MAS44	57.05	0.34	7.70	2.87	0.07	1.49	14.79	1.12	2.68	0.06	11.83	100.00
MAS47	67.52	0.26	7.35	2.23	0.05	1.17	9.09	0.61	2.55	0.07	9.10	100.00
MAS48	61.02	0.27	6.77	2.82	0.07	0.75	11.85	1.04	2.35	0.12	12.93	100.00
MAS49	63.70	0.30	7.57	2.41	0.05	1.13	11.18	0.60	2.64	0.07	10.35	100.00
MAS50	60.58	0.23	6.55	2.25	0.06	0.89	13.27	0.58	2.57	0.08	12.95	100.00
MAS54	56.30	0.38	8.09	3.47	0.11	2.34	13.83	0.67	2.52	0.68	11.61	100.00
MAS56	61.45	0.35	8.52	3.16	0.07	1.68	11.13	1.22	2.81	0.06	9.55	100.00

Tab. 5.3. Composizione chimica degli elementi maggiori espressi in percentuale in peso (% wt) ottenuta mediante analisi XRF. (LOI: loss on ignition).

	Ni	Cr	V	La	Ce	Co	Ba	Nb	Y	Sr	Zr	Pb
MAS2	36	71	83	n.d.	27	11	217	8	18	595	95	131
MAS8	101	175	111	8	27	15	294	8	20	561	105	82
MAS9	83	140	62	n.d.	28	12	234	7	17	508	87	154
MAS14	135	218	106	n.d.	31	20	238	6	20	397	94	114
MAS17	50	71	61	n.d.	22	8	271	7	15	430	88	51
MAS20	123	176	92	11	25	19	183	6	19	498	83	90
MAS22	101	154	78	n.d.	24	16	209	4	17	745	75	43
MAS24	148	206	115	9	29	21	307	7	20	465	89	67
MAS29	76	136	101	11	35	14	233	9	22	351	101	110
MAS33	21	38	48	n.d.	24	3	280	6	12	520	89	66
MAS34	124	213	100	6	26	18	203	7	20	382	91	167
MAS38	43	74	100	n.d.	27	9	425	7	16	641	93	44
MAS42	155	249	110	n.d.	29	24	225	8	22	477	100	65
MAS44	40	78	55	n.d.	27	12	318	8	16	476	107	79
MAS47	19	40	49	11	48	4	357	7	15	202	96	47
MAS48	17	31	51	16	34	8	354	10	12	175	61	52
MAS49	19	33	48	n.d.	21	6	313	8	15	200	96	95
MAS50	20	27	42	n.d.	24	8	382	6	16	277	89	91
MAS54	64	101	87	9	34	11	328	8	20	386	96	68
MAS56	36	74	60	12	28	8	348	7	18	302	106	32

Tab. 5.4. Composizione chimica degli elementi in tracce, espressa in ppm, ottenuta mediante analisi XRF. (n.d.: non determinato, al di sotto del limite di rilevabilità).

Come detto in precedenza, esiste una datazione preliminare delle malte (Capitolo 3) derivante da studi di tipo storico-architettonico (Mainstone, 2009). In Tab. 5.5 sono indicate le possibili fasi costruttive in cui sono state realizzate le malte oggetto del nostro studio, ricavate dagli studi precedenti (Mainstone, 2009). È interessante notare che, confrontando i risultati ottenuti dalla cluster analysis e le datazioni storiche ricavate da

studi precedenti, soltanto i campioni indicati in verde (Tab. 5.5) mostrano una perfetta corrispondenza tra le due interpretazioni.

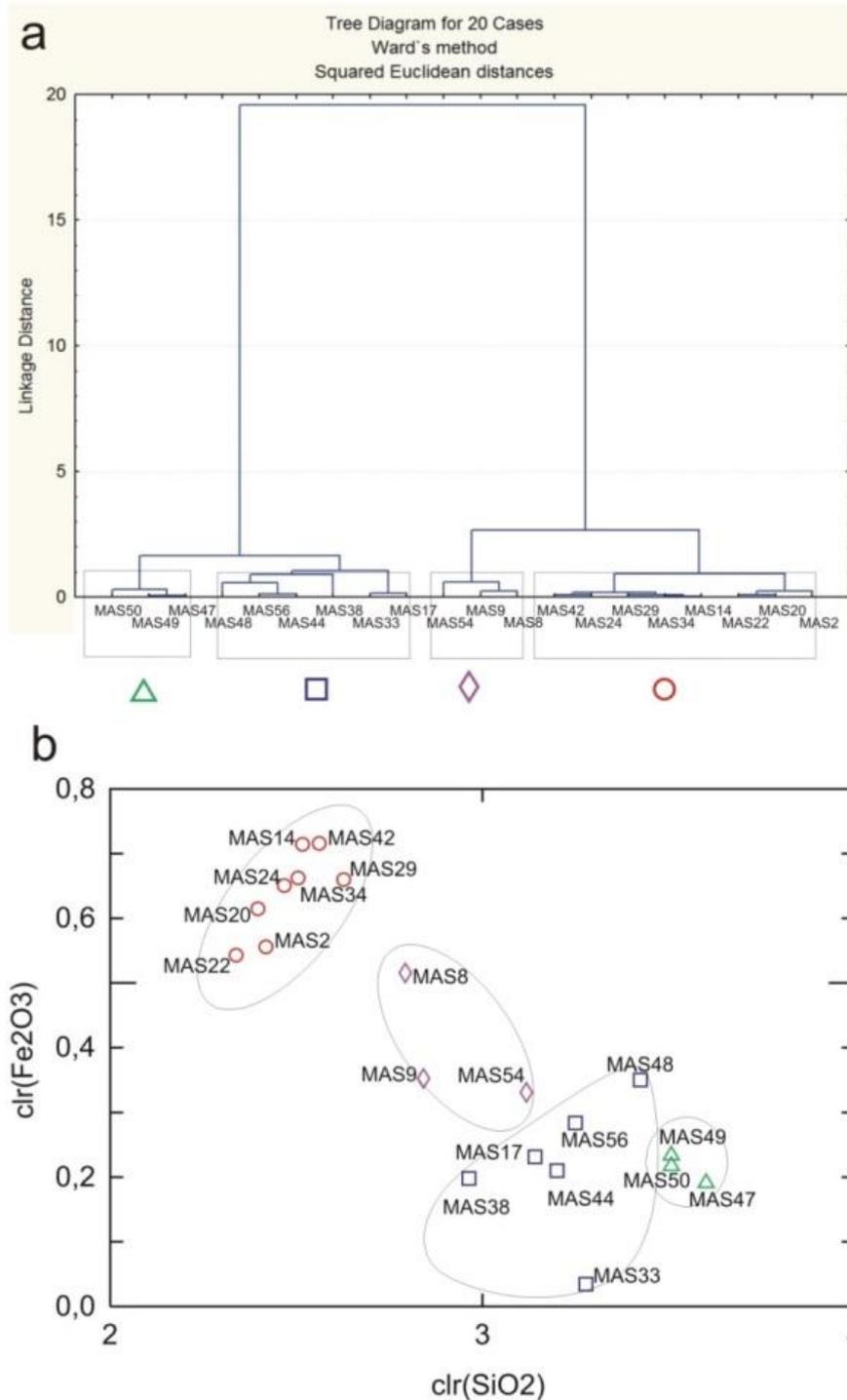


Fig. 5.45. a) Cluster analysis eseguita per le malte considerando tutti gli elementi maggiori, eccetto P_2O_5 e H_2O ; b) Biplot di Fe_2O_3 vs SiO_2 eseguito dopo la trasformazione dei dati in clr (Aitchison 1986), in cui i campioni sono stati raggruppati ed indicizzati secondo i gruppi rappresentati in Fig. a.

Infatti, in Tab. 5.5 si può osservare come quasi tutti i campioni che teoricamente dovrebbero appartenere al VI secolo, cadono nello stesso gruppo (indicato con il tondino) ad eccezione dei campioni MAS17, MAS33, MAS38 e MAS44. Lo stesso si può dire per i campioni che dovrebbero appartenere al IV secolo (indicati con il triangolo), ad eccezione dei campioni MAS48 e MAS54. Per quanto riguarda i campioni appartenenti al X secolo, cadono nello stesso gruppo (rombi) i campioni MAS8 e MAS9, mentre sono discordanti con le ipotesi storico-architettoniche i campioni MAS14, MAS42 e MAS56. In pratica su 20 campioni, 11 concordano con le ipotesi storico-architettoniche e ben 9 mostrano discrepanze significative.

Sigla	Probabile datazione derivante da studi di tipo storico-architettonico	Raggruppamenti ottenuti con la cluster analysis su base chimica
MAS_2	VI secolo	○
MAS_8	X secolo	◇
MAS_9	X secolo (?)	◇
MAS_14	X secolo	○
MAS_17	VI secolo	□
MAS_20	VI secolo	○
MAS_22	VI secolo	○
MAS_24	VI secolo	○
MAS_29	VI secolo	○
MAS_33	VI secolo	□
MAS_34	VI secolo	○
MAS_38	VI secolo	□
MAS_42	X secolo	○
MAS_44	VI secolo	□
MAS_47	IV secolo (?)	△
MAS_48	IV secolo (?)	□
MAS_49	IV secolo (?)	△
MAS_50	IV secolo (?)	△
MAS_54	IV secolo (?)	◇
MAS_56	X-XIV secolo (?)	□

Tab. 5.5. Datazione preliminare delle malte derivante da studi di tipo storico-architettonico (Mainstone, 2009). In verde sono indicate le malte per cui esiste una buona corrispondenza tra le ipotesi storiche e i gruppi individuati su base chimica mediante cluster analysis. In rosso sono indicate le malte per cui tale corrispondenza non esiste.

Alla luce di quanto osservato prima, lo studio petrografico di dettaglio dei campioni in sezione sottile, diventa fondamentale per confermare o confutare le interpretazioni sin qui fatte; infatti, tale studio può aiutarci a capire se le differenze osservate su base chimica mediante la cluster analysis, hanno un reale significato minero-petrografico o sono dovute, semplicemente, a significative variazioni chimiche all'interno della stessa fase costruttiva, spiegabili con la presenza di frammenti di cocchiopesto di grosse dimensioni presenti all'interno degli impasti.

L'osservazione delle sezioni sottili dei campioni, mediante microscopia ottica a luce polarizzata trasmessa, ha permesso di ricavare dettagliate informazioni sulla composizione minero-petrografica dell'aggregato e ha consentito di suddividere i campioni nelle tipologie petrografiche seguenti:

- Tipologia 1: raggruppa i campioni MAS14, MAS20, MAS22, MAS24, MAS29, MAS34 e MAS42. Questi campioni mostrano un aggregato costituito prevalentemente da frammenti di cocchiopesto. La maggior parte dei frammenti di cocchiopesto presenta evidenti bordi di reazione (Fig. 5.46a) legati, molto probabilmente, a fenomeni di idraulizzazione ed alla conseguente formazione di fasi C-S-H. Secondariamente è possibile trovare sempre la presenza di tracce di frammenti di rocce granitiche (Fig. 5.46c), associate, talvolta, a frammenti di tipo quarzítico. In alcuni campioni si riconosce la presenza di grumi di calce (Fig. 5.46b) e tracce di carbone, interpretabile come residuo del combustibile utilizzato nel processo di calcinazione dei calcari usati per la produzione della calce.
- Tipologia 2: rappresentata dal solo campione MAS2. Questa è molto simile alla tipologia 1; anche qui l'aggregato è formato prevalentemente da frammenti di cocchiopesto, con tracce di frammenti di rocce granitiche e quarzítiche. La differenza fondamentale, rispetto alla tipologia 1, è la presenza di evidenti tracce di bioclasti (Fig. 5.46e) e frammenti di calcari microcristallini (Fig. 5.46f).

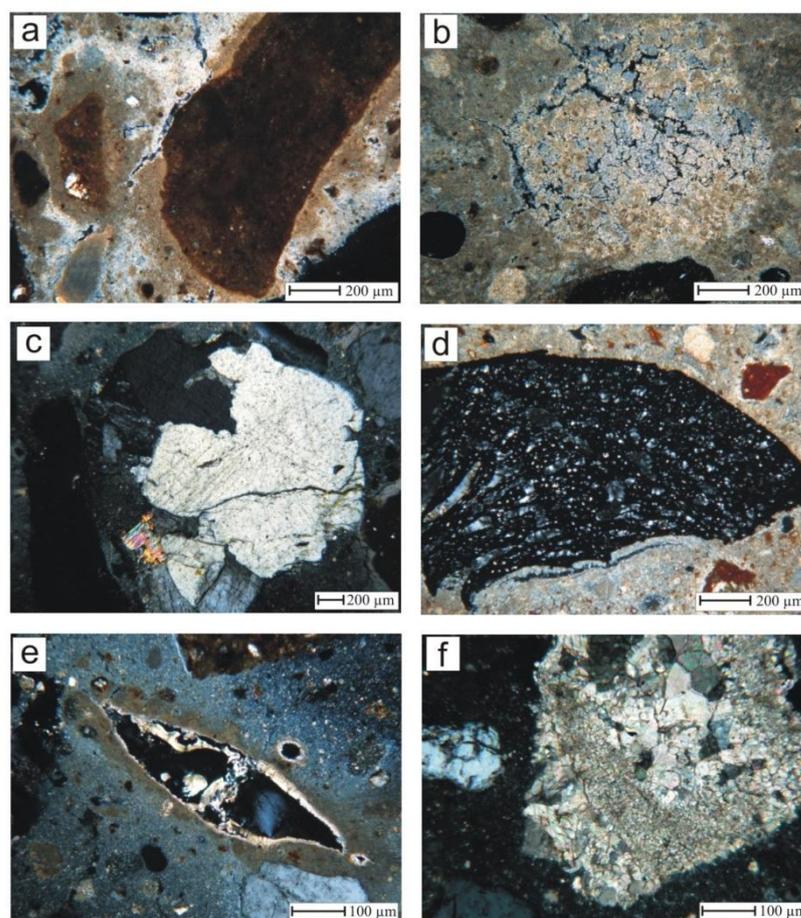


Fig. 5.46. Micro foto eseguite al microscopio ottico polarizzatore a nicols incrociati. **a)** Frammento di cocciopesto con bordo di reazione nel campione MAS14. **b)** Grumo di calce nel campione MAS22. **c)** Frammento granitico nel campione MAS2. **d)** Frammento di carbone nel campione MAS29. **e)** Bioclasto nel campione MAS2. **f)** Frammento di calcare microcristallino nel campione MAS2.

- Tipologia 3: raggruppa i campioni MAS47, MAS48, MAS49 e MAS50. Rispetto ai campioni precedenti la frazione silico-clastica, costituita da frammenti granitici e quarzitici, prevale di poco rispetto ai frammenti di cocciopesto. Non si osservano né bioclasti, né frammenti di calcare. I campioni appartenenti a tale tipologia sono quelli in cui il legante è maggiormente interessato da fenomeni di ricristallizzazione. Anche i pori presentano tipici orli di ricristallizzazione (Fig. 5.47).

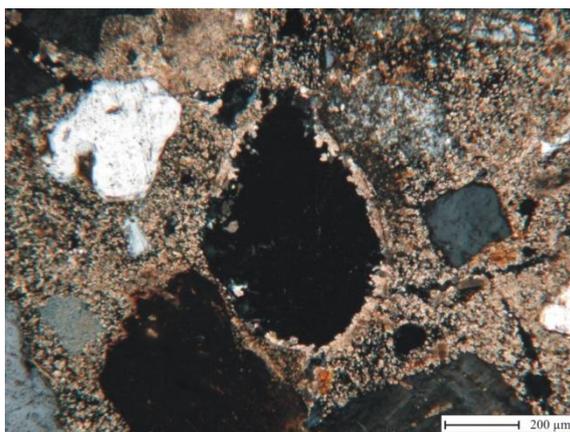


Fig. 5.47. Micro foto eseguita a polarizzatori incrociati di un poro con evidenti orli di ricristallizzazione (campione MAS42).

- Tipologia 4: raggruppa i campioni MAS8 e MAS9. Anche in questi campioni prevale leggermente la frazione silicoclastica (granitoidi e quarziti) sul cocchiopesto. Si differenzia dalla tipologia 3 per il fatto che oltre alla componente silicoclastica, si riconoscono diversi frammenti di bioclasti (Fig. 5.48a e c) e rocce carbonatiche criptocristalline di forma pseudo ellittica (Fig. 5.48c). Abbondante anche la presenza di ortoclasio pertitico (Fig. 5.48b e c). Gran parte dei frammenti di cocchiopesto presenta bordi di reazione evidenti (Fig. 5.48d).

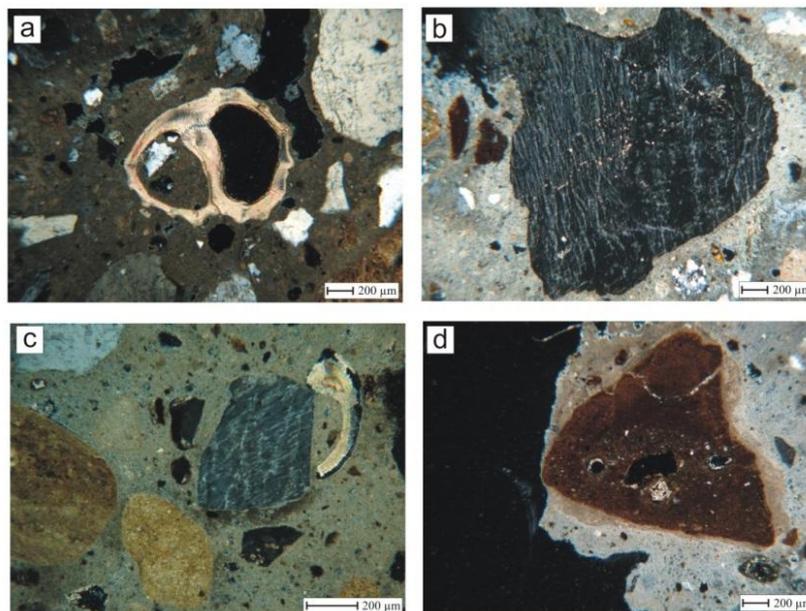


Fig. 5.48. Micro foto eseguite al microscopio ottico polarizzatore a nicols incrociati. **a)** Bioclasto nel campione MAS8. **b)** Ortoclasio pertitico nel campione MAS8. **c)** Calcari criptocristallini, ortoclasio pertitico e bioclasto (procedendo da sinistra a destra) nel campione MAS9. **d)** Frammento di cocchiopesto con bordo di reazione nel campione MAS9.

- Tipologia 5: costituita dai campioni MAS44 e MAS54. La differenza più evidente rispetto a tutti gli altri campioni riguarda il contenuto di cocchiopesto, che risulta il più basso in assoluto. In entrambe i campioni prevale la presenza di frammenti granitici e quarzatici. Secondariamente è possibile osservare la presenza di bioclasti, calcari criptocristallini e microcristallini.
- Tipologia 6: raggruppa i campioni MAS33, MAS38 e MAS56. Prevale la frazione silicoclastica (graniti e quarziti) rispetto al cocchiopesto. Qui la frazione silicoclastica è associata a calcari criptocristallini, mentre non si rileva la presenza di bioclasti.
- Tipologia 7: riguarda il solo campione MAS17. Prevale la frazione silicoclastica (graniti e quarziti) rispetto al cocchiopesto. Qui la frazione silicoclastica è associata a bioclasti, mentre non si rileva la presenza di calcari criptocristallini.

Riassumendo, lo studio petrografico ha consentito di verificare con maggior dettaglio le analogie e le differenze tra i vari campioni di malta, consentendo di riconoscere sette tipologie di malte differenti. Considerando le datazioni fatte su base storico-archeologica e alla luce delle riconosciute analogie composizionali, si può dire che il gruppo di malte più numeroso (MAS14, MAS20, MAS22, MAS24, MAS29, MAS34 e MAS42), molto probabilmente appartiene alla fase costruttiva realizzata nel VI secolo (Tab. 5.6). I campioni MAS47, MAS48, MAS49 e MAS50, è probabile che appartengano alla fase più antica (IV secolo); ciò è supportato dal fatto che tali malte sono state prelevate al di sotto dell'attuale piano di cammino di Santa Sofia, all'interno di un saggio di scavo attualmente aperto, posto alla sinistra dell'entrata principale. Inoltre, tali campioni, sono quelli che presentano maggiori fenomeni di ricristallizzazione del legante, che generalmente si verificano in tempi piuttosto lunghi. Le malte MAS8 e MAS9, molto probabilmente appartengono al X secolo.

I restanti campioni sicuramente hanno caratteristiche particolari che possono essere ricondotte ad almeno altre 4 tipologie composizionali, diverse dalle precedenti. Purtroppo la pessima corrispondenza di tali tipologie di malte con le datazioni proposte dagli studi di tipo storico-archeologico non consente, momentaneamente, di formulare ipotesi di

datazione. In futuro, si cercherà di porre la questione agli storici e agli architetti che lavorano a Santa Sofia per cercare di trovare delle soluzioni adeguate al problema.

Sigla	Probabile datazione derivante da studi di tipo storico-architettonico	Raggruppamenti verificati mediante lo studio petrografico in sezione sottile e nuova datazione proposta
MAS_2	VI secolo	?
MAS_8	X secolo	X secolo
MAS_9	X secolo (?)	X secolo
MAS_14	X secolo	VI secolo
MAS_17	VI secolo	?
MAS_20	VI secolo	VI secolo
MAS_22	VI secolo	VI secolo
MAS_24	VI secolo	VI secolo
MAS_29	VI secolo	VI secolo
MAS_33	VI secolo	?
MAS_34	VI secolo	VI secolo
MAS_38	VI secolo	?
MAS_42	X secolo	VI secolo
MAS_44	VI secolo	?
MAS_47	IV secolo (?)	IV secolo
MAS_48	IV secolo (?)	IV secolo
MAS_49	IV secolo (?)	IV secolo
MAS_50	IV secolo (?)	IV secolo
MAS_54	IV secolo (?)	?
MAS_56	X-XIV secolo (?)	?

Tabella 6 Nella seconda colonna è riportata la datazione preliminare delle malte derivante da studi di tipo storico-architettonico (Mainstone 2009). Nella terza colonna colori simili indicano malte composizionalmente simili, appartenenti molto probabilmente alla stessa fase costruttiva.

Confrontando la composizione minero-petrografica dei vari tipi di aggregato utilizzati nelle malte del IV, del VI e del X secolo è possibile fare alcune importanti considerazioni. Molto probabilmente nel IV e nel VI secolo si utilizzava come aggregato, insieme al cocchiopesto, una sabbia costituita prevalentemente da frammenti di derivazione granitica e secondariamente quarzifica, priva di bioclasti e rocce carbonatiche. Nel X secolo, compare una sabbia differente, più ricca in ortoclasio peritico e mista a frammenti di bioclasti e di calcari criptocristallini.

Oltre a queste due tipologie di sabbie, nella tipologia 6 e nella tipologia 7, sono state evidenziate altre due tipologie di sabbie differenti dalle precedenti; infatti nella tipologia 6, accanto alla componente granitica, è associata un frazione aggregata a base di calcari senza la presenza di bioclasti; mentre nella tipologia 7, accanto alla componente granitica, sono presenti tracce di bioclasti e non si rilevano calcari. Quindi è molto probabile che per confezionare le 20 malte studiate sono state utilizzate almeno 4 tipologie differenti di sabbie provenienti da livelli geologici diversi (o cave diverse).

Esistono anche delle differenze significative relative alla quantità media di cocchiopesto utilizzato nei diversi momenti storici. Molto probabilmente, il VI secolo è quello in cui si utilizza la quantità maggiore di cocchiopesto negli impasti: circa il 35 % nel VI secolo (Fig. 5.49), rispetto al 13% del IV secolo e al 17% del X secolo.

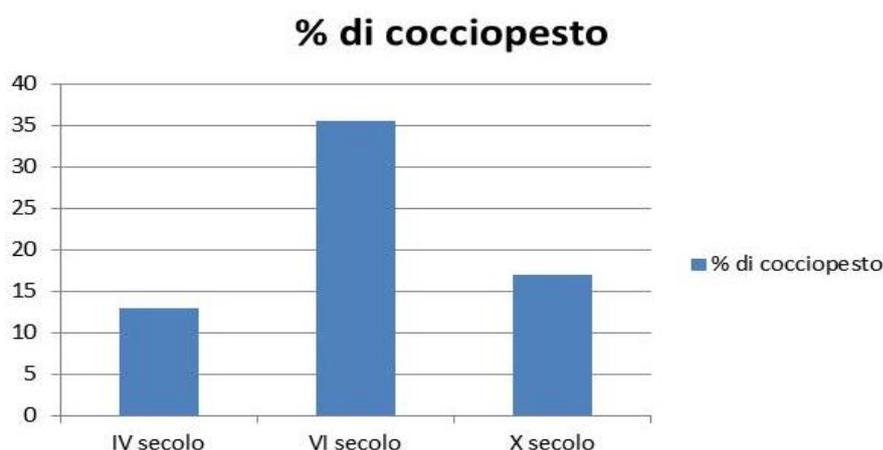


Fig. 5.49. Contenuto medio della quantità di cocchiopesto utilizzato nelle malte del IV, del VI e del X secolo. La stima è stata eseguita applicando l'analisi d'immagine (utilizzando il software ImageJ 1.48v) su sezioni sottili acquisite mediante scanner piano a luce naturale trasmessa.

5.6.2 Composizione del legante delle malte

Per avere informazioni sulla composizione chimica del legante delle malte di Santa Sofia è stata utilizzata la microanalisi SEM-EDS. Le microanalisi sono state condotte sia sui grumi, che sul legante, avendo cura di selezionare aree omogenee di 20 micron. Nelle Tab. 5.7 e 5.8 sono riportate le analisi medie per ciascun campione relative al legante e ai grumi.

Valore medio	N° analisi	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ClO	Somma	HI
MAS2_B	3	15.76	5.15	0.00	3.04	71.32	2.65	0.89	0.00	1.19	100.00	0.28
MAS8_B	3	15.15	3.93	0.00	2.31	74.41	2.46	1.12	0.00	0.61	100.00	0.25
MAS9_B	4	21.13	7.51	1.96	6.10	56.53	3.51	1.40	0.00	1.85	100.00	0.49
MAS14_B	3	8.66	2.89	2.72	1.60	80.06	2.01	0.86	0.00	1.19	100.00	0.17
MAS17_B	6	12.94	3.88	1.06	2.10	76.61	1.92	0.72	0.00	0.76	100.00	0.23
MAS20_B	3	26.41	9.85	1.46	3.05	51.28	3.60	2.09	0.86	1.40	100.00	0.69
MAS22_B	4	19.87	7.50	1.54	5.01	60.58	2.49	1.38	0.00	1.62	100.00	0.44
MAS24_B	6	27.12	10.76	1.96	2.35	54.09	1.81	1.22	0.00	0.70	100.00	0.71
MAS29_B	5	20.23	7.09	1.75	1.54	64.72	1.85	1.02	0.76	1.03	100.00	0.44
MAS33_B	4	10.88	2.47	1.00	3.04	79.64	2.26	0.33	0.00	0.38	100.00	0.17
MAS34_B	4	10.22	3.43	1.62	1.70	80.21	1.10	0.51	0.61	0.61	100.00	0.19
MAS38_B	3	7.29	2.69	1.26	2.01	81.40	2.58	0.59	0.00	2.20	100.00	0.13
MAS42_B	4	13.19	4.43	1.40	1.99	74.82	2.20	0.55	0.62	0.82	100.00	0.25
MAS44_B	4	11.84	3.69	1.49	3.20	75.48	2.13	0.66	0.42	1.09	100.00	0.22
MAS47_B	3	27.54	7.02	1.20	1.26	61.06	0.00	0.86	0.50	0.57	100.00	0.57
MAS48_B	3	12.75	4.58	1.23	1.82	78.90	0.00	0.36	0.00	0.36	100.00	0.23
MAS49_B	2	23.64	7.23	2.38	3.50	61.62	0.00	0.85	0.00	0.77	100.00	0.51
MAS50_B	2	24.21	7.40	1.54	1.56	62.77	0.90	1.01	0.00	0.61	100.00	0.52
MAS54_B	5	11.68	2.40	1.37	2.05	79.64	1.39	0.35	0.71	0.41	100.00	0.19
MAS56_B	4	13.56	3.62	1.80	1.45	75.91	2.31	0.57	0.00	0.78	100.00	0.25

Tab. 5.7. Microanalisi medie SEM-EDS del legante (B: binder) relative alla malte studiate (HI: indice di idraulicità secondo Vicat).

Valore medio	N° analisi	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	ClO	somma	HI
MAS2_L	2	8.02	3.62	0.00	5.14	79.68	2.14	0.00	1.40	100.00	0.14
MAS8_L	1	14.28	3.44	0.00	3.37	74.61	2.59	1.00	0.71	100.00	0.23
MAS9_L	4	11.17	3.89	0.95	4.69	74.79	2.35	0.72	1.44	100.00	0.20
MAS14_L	3	3.00	1.13	0.00	0.83	92.75	1.37	0.00	0.92	100.00	0.04
MAS20_L	3	5.41	2.89	1.18	1.95	85.49	1.62	0.55	0.91	100.00	0.11
MAS22_L	2	12.55	4.40	0.00	3.53	74.92	1.77	0.70	2.14	100.00	0.22
MAS29_L	2	5.50	1.33	0.00	0.68	91.68	0.00	0.00	0.82	100.00	0.07
MAS34_L	3	4.18	2.14	1.00	1.88	88.19	1.44	0.43	0.73	100.00	0.08
MAS38_L	2	7.89	2.46	0.00	1.66	82.39	2.97	0.73	1.90	100.00	0.12
MAS42_L	2	5.64	1.47	1.14	1.24	86.86	2.44	0.00	1.21	100.00	0.09
MAS44_L	1	9.29	2.08	0.00	3.42	82.59	1.56	0.00	1.06	100.00	0.13
MAS47_L	1	22.08	5.92	0.00	1.68	69.41	0.00	0.00	0.91	100.00	0.39
MAS48_L	2	11.06	4.56	0.71	2.86	80.30	0.00	0.27	0.25	100.00	0.20
MAS49_L	1	23.79	8.04	0.00	4.91	63.26	0.00	0.00	0.00	100.00	0.47
MAS56_L	2	4.87	3.06	0.00	0.80	90.49	0.00	0.00	0.78	100.00	0.09

Tab. 5.8. Microanalisi medie SEM-EDS dei grumi (L: lump) relative alla malte studiate (HI: indice di idraulicità secondo Vicat).

Le osservazioni al SEM e le osservazioni eseguite al microscopio ottico polarizzatore hanno permesso di evidenziare la presenza di cocchiopesto polverizzato di dimensioni talvolta inferiori a 1/16 mm. Questo significa che le analisi eseguite sul legante non possono essere considerate come misure robuste e rappresentative della composizione reale del legante, poiché le piccole particelle di cocchiopesto possono rendere il legante chimicamente disomogeneo. Tuttavia, facendo riferimento all'indice di idraulicità (HI), si può dire che, mediamente, il valore di HI relativo al legante delle malte di Santa Sofia si attesta intorno a 0.35 (Tab. 5.7). Tale valore è compatibile con quello delle *calci*

propriamente idrauliche. Misurando il valore medio di HI sui grumi (Tab. 5.8), generalmente rappresentativi della composizione chimica dei calcari di partenza utilizzati per la preparazione della calce, il valore di HI è di circa 1.17. Ciò significa che per preparare la calce si utilizzavano in partenza calcari già ricchi in idrauliti (Si, Al, Fe), che consentivano di ottenere una calce naturale *mediamente idraulica*. Tale valore di idraulicità aumenta grazie all'aggiunta di cocchiopesto.

Le microanalisi nel legante, in corrispondenza dei bordi di reazione del cocchiopesto, ha evidenziato inoltre la presenza di gel (o cristalli a bassa cristallinità) la cui morfologia è compatibile con quella delle fasi C-S-H (Fig. 9).

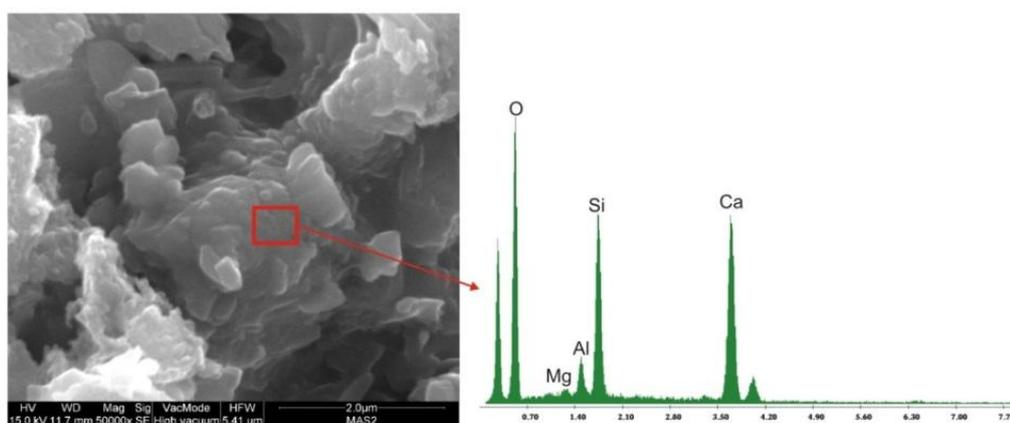


Fig. 5.50. Micro-analisi SEM-EDS del legante del campione MAS2. Si evidenzia la probabile presenza di fasi C-S-H a bassa cristallinità.

I rapporti Si/Ca misurati in corrispondenza dei bordi di reazione vicino a 1 sono tipici delle fasi C-S-H (Fig. 5.50). Per confermare la presenza di queste fasi a bassa cristallinità è stato impiegato il Microscopio Elettronico a Trasmissione (TEM). Questo consente di acquisire informazioni dettagliate riguardo alla presenza di “morfologie tipo” quelle dei silicati idrati di calcio (C-S-H). Le misure sono state eseguite sul legante asportato all'interfaccia con il cocchiopesto. La Fig. 5.51 mostra un rappresentativo set di immagini con le tipiche morfologie delle fasi C-S-H già osservate in letteratura (Silva et al., 2009).

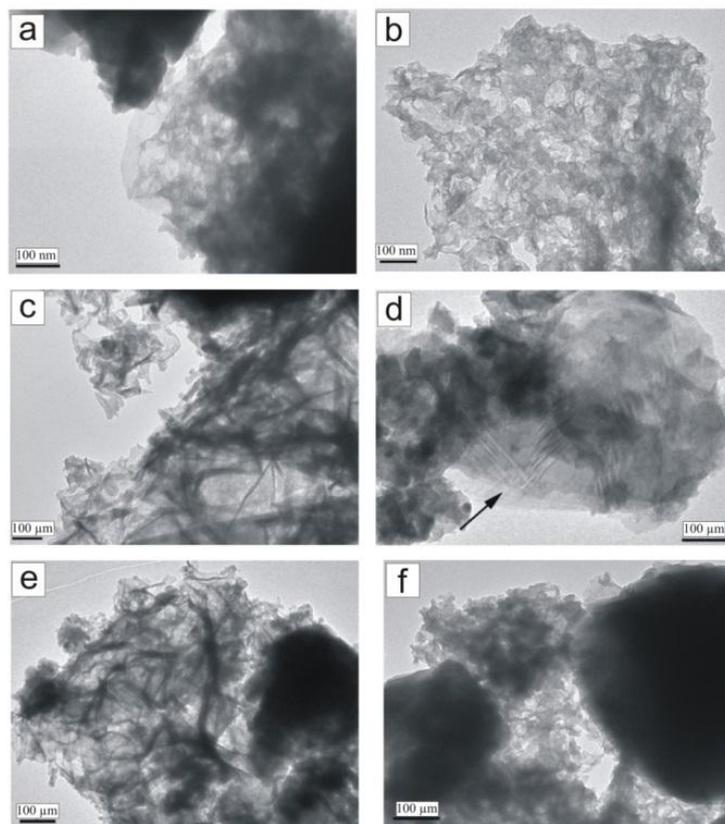


Fig. 5.51. Microimmagini TEM relative a differenti morfologie di fasi C-S-H. **a, b, d, f)** Morfologia crumpled sheets. **c, e)** morfologie sheet and needle. Nell'immagine **d** la freccia indica l'aumento della densità cristallina. [a: MAS20; b: MAS20; c: MAS9; d: MAS9; e: MAS50; f: MAS38].

5.6.3 Alcune considerazioni sullo stato di conservazione delle malte

Molti dei materiali costruttivi che costituiscono Santa Sofia, come evidenziato nei paragrafi precedenti, presentano diversi problemi di alterazione e degrado. Le malte in particolare, in prima analisi non sembrerebbero mostrare particolari fenomeni di alterazione; anzi, in alcuni casi, se confrontati con i laterizi vicini, rispetto agli stessi, interessati da fenomeni di polverizzazione, presentano una maggiore resistenza. La coesione delle malte, durante le fasi del campionamento, si è rivelata piuttosto elevata. Tuttavia in due campioni (MAS22 e MAS38), è stata rilevata una coesione piuttosto bassa; infatti era possibile spezzare gli stessi con le mani senza applicare una forza eccessiva. Per indagare le cause di tale comportamento, i soli campioni MAS22 e MAS38 sono stati osservati al microscopio elettronico a scansione tali e quali. Le osservazioni hanno

permesso di evidenziare la presenza di sali, in particolare cloruro di sodio (NaCl), che occludono parzialmente la porosità del campione (Fig. 5.52).

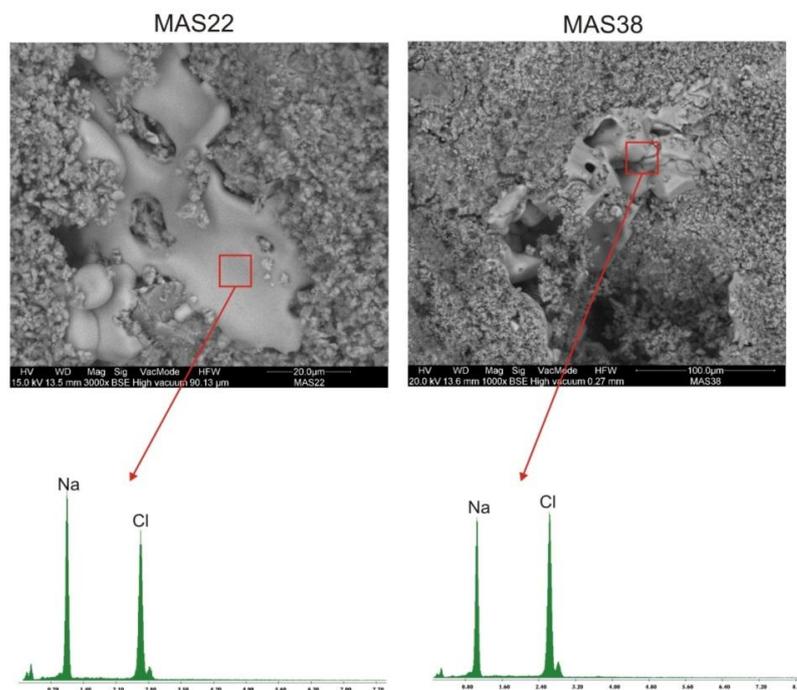


Fig. 5.52. Cristallizzazioni saline di cloruro di sodio (NaCl) all'interno dei pori dei campioni MAS22 e MAS38, visibili mediante micro-analisi SEM-EDS.

La presenza significativa di cloro in tutti i campioni è stata anche evidenziata dalle analisi eseguite sul legante delle malte (Tab. 5.7). È importante notare come le osservazioni in sezione sottile non hanno rilevato attorno ai pori la presenza di cristallizzazioni saline. Ciò è dovuto, molto probabilmente, all'elevata solubilità del cloruro di sodio, che viene praticamente disciolto durante la preparazione della sezione sottile stessa a causa dell'acqua utilizzata durante tutto il processo di lavorazione (dal taglio del campione, alla levigatura e lucidatura dello stesso). Vista l'elevata altezza alla quale si trovano i campioni rispetto al piano di cammino (29 m per il campione MAS22; 25 m per il campione MAS38), non è realistico imputare la presenza di sali solubili alla risalita capillare di acque soprassature in cloruri dal basso; piuttosto, vista la vicinanza di Santa Sofia al mare (circa 500 m in linea d'aria), ciò potrebbe essere dovuto all'aerosol marino, che trasporta in sospensione sali, depositandoli sulla superficie della struttura architettonica o, in alternativa, a sali che provengono da intonaci reintegrati in restauri recenti.

CAPITOLO 6

COSTRUZIONE DEL DATABASE GIS 3D

6.1 Generalità sui Sistemi GIS

Il Geographic Information System (definito semplicemente GIS) è un sistema informativo computerizzato che permette l'acquisizione, la registrazione, l'analisi, la visualizzazione e la restituzione di informazioni derivanti da dati geografici (georiferiti). Secondo la definizione di Burrough (Burrough, 1986), "Il 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 ed analizzare dati spaziali, associando a ciascun elemento geografico una o più descrizioni alfanumeriche.

Il GIS è l'ambiente Software che permette l'elaborazione e la manipolazione dei dati geometrici georeferenziati, che sono memorizzati in strutture dati del tipo DBMS (Database Management System) che gestiscono anche la spazialità, permettendoci così di "mappare" ed analizzare le informazioni territoriali.

La finalità è quella di poter disporre di un unico sistema informativo che raggruppa diverse discipline, quali la geografia, la cartografia, la fotogrammetria, il rilevamento, la geodesia, l'ingegneria, la statistica. I sistemi GIS mettono in relazione informazioni che derivano dalle varie discipline accomunandole però con un riferimento spaziale, usando la "georeferenziazione" come principale dato di immagazzinamento e di gestione delle informazioni.

Non va, quindi, considerato come un semplice sistema composto da hardware e software, bensì come una metodologia di approccio all'analisi di dati ed informazioni spaziali, utilizzata per prendere decisioni oppure per meglio comprendere problemi connessi a specifici progetti.

I componenti chiave necessari per costruire un GIS sono:

- *Hardware*: è la componente fisica su cui viene installato e dovrà poi girare il sistema montato. Generalmente è costituito da computer con schede performanti ed una buona memoria;

- *Software*: è l'applicativo che verrà usato per interfacciarsi con i dati e le informazioni spaziali. Ne esistono di diversi tipi e la scelta è dettata dal tipo di lavoro al quale dovrà dare il suo contributo il GIS, la scelta del software verrà trattata nel paragrafo successivo;
- *Dati*: è sicuramente la parte più costosa dell'intero sistema, poiché necessità di periodi più o meno lunghi per la loro acquisizione oppure, in alternativa, sono dati che vanno acquistati da appositi fornitori, normalmente si tratta di descrizioni più o meno dettagliate dei dati (Fig. 6.1) ai quali vengono associate le informazioni spaziali (latitudine, longitudine, altitudine);
- *Risorse Umane*: è indubbio che ci siano persone che gestiscono il sistema, lo interrogano ed analizzano i dati per facilitare i processi decisionali;
- *Utilizzatori Finali*: i dati analizzati e trattati opportunamente creano scenari più o meno personalizzati agli utenti finali, che ora hanno uno strumento in più a disposizione per le analisi decisionali e la loro rappresentazione attraverso cartografia tematica.

I modelli utilizzati dai GIS sono generalmente divisi in:

- *Modello Raster*, composto da celle di egual misura organizzate secondo specifiche righe e colonne definite *picture element* (meglio conosciuti come pixel), particolarmente indicati quando si devono rappresentare dati che hanno variazioni cromatiche molto lievi (es: foto aeree)
- *Modello Vettoriale*, ideale per rappresentare oggetti con limiti ben distinti (punti, polilinee oppure poligoni).

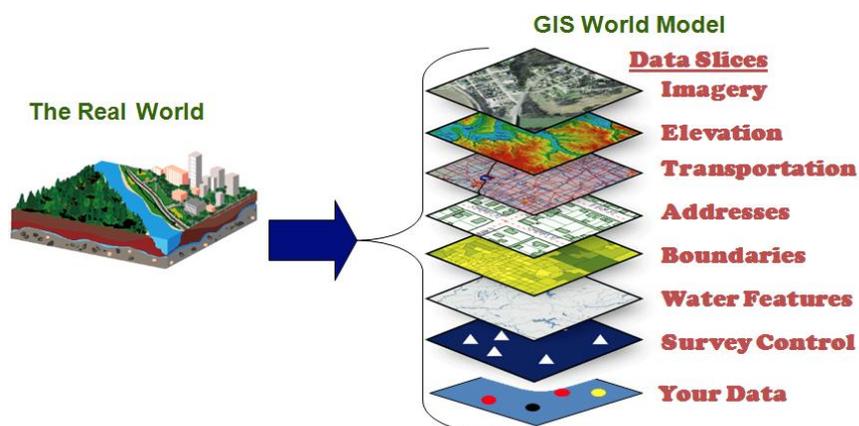


Fig. 6.1. Esempio di tipologie di dati che possono essere inseriti all'interno di un sistema GIS.

È possibile riassumere i processi che portano alla creazione di un sistema GIS operativo nel modo seguente:

- INPUT: immissione dei dati alfanumerici (creati o acquistati) per poter trovare alloggiamento nel database che conterrà tutte le informazioni;
- ELABORAZIONE: l'operazione più frequente che viene effettuata in questa fase è la normalizzazione dei dati, ossia la realizzazione di opportuni processi di trasformazione che faranno sovrapporre i dati geografici nella rispettiva area di lavoro;
- QUERY: rappresentano tutte le interrogazioni che vengono fatte al sistema per poter generare i dati derivanti;
- VISUALIZZAZIONE: sono le rappresentazioni su mappa che il sistema genera a seguito delle specifiche query impostate.

Il geodatabase (contenitore delle informazioni del GIS) è un insieme di dati geografici di vario tipo gestiti sia in formato file, sia come database relazionale, utilizzato per l'editing e l'automazione dei dati. Questo consiste in un modello di archiviazione di geometrie semplici (punti linee e poligoni) il quale supporta non solo le *feature class*, i *raster* e gli attributi, ma permette di implementare regole avanzate di integrità e di comportamento dei dati GIS, utilizzando e/o mettendo in relazione tipi di dati quali le proprietà qualitative delle figure geometriche (le cosiddette analisi topologie), le reti, i cataloghi raster, le relazioni, i sottotipi ed i domini.

In pratica, lo distingue da un formato dati (esempio lo shapefile) il fatto che all'interno del geodatabase possono essere memorizzate anche regole e relazioni (sulle features o sugli attributi) che intervengono tra gli oggetti del mondo reale che si cerca di rappresentare al suo interno.

Il modello relazionale è un modello di rappresentazione o strutturazione dei dati di un database implementato su sistemi di gestione di basi dati (in inglese DBMS; *Database Management System*), detti perciò sistemi di gestione di basi di dati relazionali (in inglese RDBMS; *Relational Database Management System*); è strutturato matematicamente intorno al concetto matematico di *tabella*, ossia di un primo campo chiamato intestazione o testata con i nomi dei vari campi o attributi ed i valori assunti da questi nelle rispettive righe nel corpo sottostante.

Il principio base del modello relazionale è dunque che tutte le informazioni siano rappresentate da valori inseriti in tabelle. Un database relazionale è, quindi, un insieme di relazioni contenenti valori e il risultato di qualunque interrogazione (o manipolazione) dei dati può essere rappresentato anch'esso da tabelle.

Le operazioni tipiche che saranno possibili su una tabella, precedentemente creata, sono le cosiddette CRUD ovvero C creazione o inserimento dati (*creation*), R lettura (*read*), U aggiornamento (*upgrade*), D cancellazione (*delete*).

Il geodatabase offre la possibilità di:

- Conservare una ricca collezione di dati spaziali in una posizione centralizzata.
- Applicare ai dati, regole sofisticate e relazioni.
- Definire modelli relazionali geospaziali avanzati (ad esempio, topologie).
- Mantenere l'integrità dei dati spaziali con un coerente ed accurato database.
- Lavorare all'interno di un ambiente DB con accesso e modifica multiutente
- Integrare i dati spaziali con altre banche dati non GIS.
- Supporto a comportamenti e funzioni personalizzate.
- Sfruttamento dei dati spaziali nel suo pieno potenziale.
- Possono usare ed editare lo stesso GeoDB molte persone contemporaneamente

La condizione necessaria per poter lavorare è che gli oggetti da analizzare vengano “proiettati nello stesso spazio geografico ricostruito dal GIS”, settando il “sistema geodetico di riferimento” (SR), ossia il sistema che indica dove si trova un oggetto sulla superficie terrestre. Generalmente si rappresentano da 3 dati: Latitudine, Longitudine ed Altitudine.

Un *datum geodetico*, detto anche semplicemente *datum*, è un sistema geodetico di riferimento che consente di definire, in termini matematici, la posizione di punti sulla superficie della Terra. Il datum consente quindi l'operazione di georeferenziazione di luoghi o oggetti. Non essendo la Terra uno sferoide perfetto, il *datum* di riferimento non può essere univoco. Si possono pertanto definire diversi modelli (*datum*) in funzione delle esigenze. È quindi sempre necessario associare alle coordinate di un punto il suo *datum* di riferimento, in quanto lo stesso punto, può avere coordinate diverse a seconda del *datum* utilizzato.

Occorre notare che il sistema di riferimento in sé è puramente teorico, quindi per il suo utilizzo pratico deve necessariamente essere associato ad un insieme fisico di punti materializzati sulla superficie della Terra, di cui si devono misurare le posizioni, ovvero assegnare le coordinate. Questo insieme di punti prende il nome di "rete di inquadramento" e costituisce la realizzazione materiale del *datum*.

Per classificare un *datum* si usa il criterio del numero di dimensioni usate per la sua definizione, si parla quindi di:

- *Datum Orizzontali* (o Planimetrici): usati nella geodesia classica basata su misure eseguite a terra;
- *Datum Verticali* (o Altimetrici): usati per la misura della quota;
- *Datum Tridimensionali*: usati nella moderna geodesia basata su misure fatte con i satelliti (chiamata anche geodesia satellitare).

La geodesia moderna è basata principalmente sulla geodesia satellitare, cioè su servizi forniti da sistemi satellitari di navigazione, detti GNSS (Global Navigation Satellite System) che permettono, ad appositi ricevitori elettronici, di determinare le coordinate geografiche (longitudine, latitudine ed altitudine) di un qualunque punto della superficie terrestre o dell'atmosfera con un errore di pochi metri. I sistemi attualmente più utilizzati sono il sistema statunitense GPS e il sistema russo GLONASS. Un sistema europeo denominato GALILEO è tuttora in fase di realizzazione e dovrebbe essere operativo entro il 2014.

Una volta definito un *datum* è possibile georeferenziare un punto, ossia definirne la posizione, mediante vari sistemi di coordinate.

Da quanto illustrato sino ad ora risulta evidente che uno stesso punto fisico ha coordinate diverse a seconda del *datum* utilizzato, che possono differire anche in modo notevole. Da questo discendono due considerazioni:

- è necessario accompagnare sempre le coordinate di un punto con l'indicazione del *datum* a cui fanno riferimento;
- per conoscere le coordinate di un punto noto in un *datum*, in un altro *datum*, è necessario effettuare un'operazione matematica.

Il *datum* utilizzato è un'informazione fondamentale nelle applicazioni GIS poiché permette di localizzare la cartografia che si sta usando e sovrapporla correttamente con un'altra cartografia proveniente da diversi soggetti.

Il sistema scelto per il presente lavoro è ricaduto sul sistema WGS84 (World Geodetic System 1984). Si tratta di un sistema di coordinate geografiche geodetico, mondiale, basato su un ellissoide di riferimento elaborato nel 1984. Esso costituisce un modello matematico della Terra da un punto di vista geometrico, geodetico e gravitazionale, costruito sulla base delle misure e delle conoscenze scientifiche e tecnologiche disponibili al 1984 che approssima il geoide nel suo complesso ed è valido per tutto il mondo.

6.2 Descrizione del Software

Tra gli strumenti informatici a disposizione nell'attuale panorama informatico, la scelta della piattaforma software è stata determinata dai seguenti fattori:

- Quantità dei dati raccolti;
- Varietà delle analisi effettuate,
- Distribuzione geografica delle analisi,
- Potenza di calcolo dell'hardware a disposizione;
- Gestione del database risultante;
- Condivisione dei dati ottenuti.

Per poter ottemperare al meglio alle esigenze appena esposte la scelta è ricaduta sulla suite denominata "Terraexplorer Pro" distribuita dalla skylineGlobe (Fig. 6.2), azienda con sede in USA. La piattaforma software SkylineGlobe offre agli utenti un rapido accesso ai dati geospaziali 3D. La tecnologia di streaming ad alta efficienza di SkylineGlobe consente un impareggiabile realismo 3D, riducendo al minimo i requisiti hardware e sistemi di rete. Il software è facile e veloce da installare in una varietà di ambienti. L'architettura aperta di SkylineGlobe ed ottimi sviluppatori di sistemi offrono un ricco set di funzionalità da utilizzare in una vasta gamma di applicazioni e sistemi. La suite si articola su tre differenti versioni:

- **Terraexplorer Viewer:** gli utenti possono navigare, ad alta risoluzione, attraverso ambienti mondo 3D creati dalla fusione di fotografie aeree e satellitari, dati di elevazione del terreno e altri strati informativi 2D e 3D. Capacità di editing di base sono disponibili così come strumenti di analisi del terreno avanzati. Quando incorporato in un pacchetto di web SkylineGlobe, il TerraExplorer Viewer standard serve come visualizzatore SkylineGlobe, fornendo funzionalità API avanzate.
- **Terraexplorer Plus:** aggiunge funzionalità e raster importazione, editing avanzato, funzionalità di catalogo di base e le interfacce avanzate Pro API.
- **Terraexplorer Pro:** Aggiunge funzionalità di publishing, editing funzionalità layer e interrogazione, oggetti avanzati e strumenti di disegno, così come una serie di strumenti per l'utilizzo professionale.

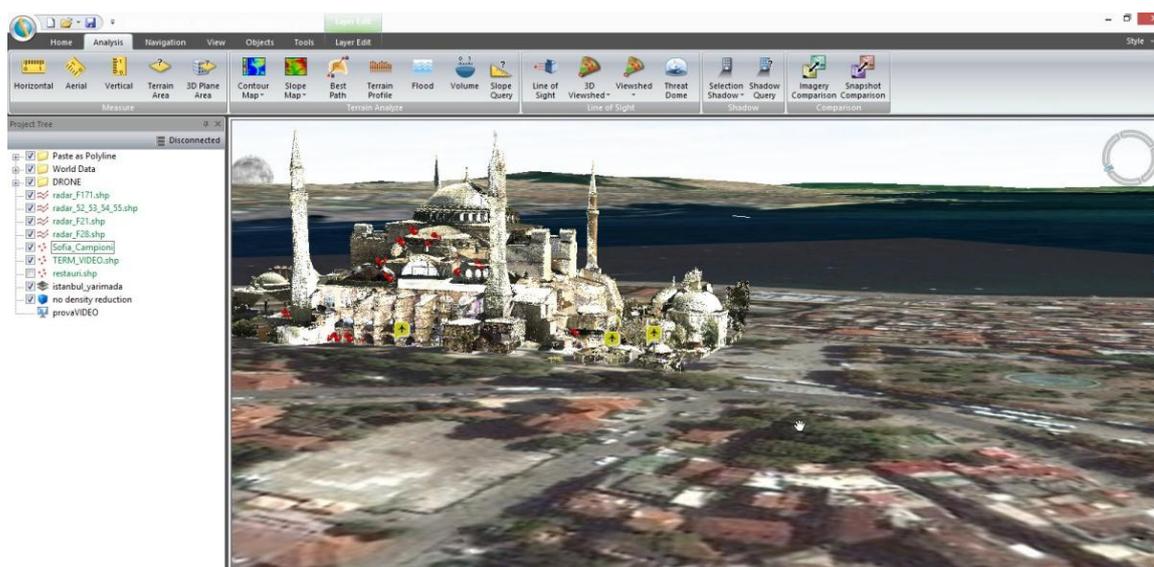


Fig. 6.2. Schermata principale del software utilizzato, che mostra la georeferenziazione di Santa Sofia.

La scelta nell'ambito di questo progetto è ricaduta sulla versione più completa disponibile, ossia il "Terraexplorer Pro" che offriva i seguenti vantaggi:

- Le immagini, i modelli 3D del suolo DEM (Digital Elevation Model), il numero di layer illimitati a disposizione e le risoluzioni dei dati ottenuti possono essere sovrapposti sul medesimo spazio geografico ricostruito in realtà GIS 3D. Morphing automatico (consiste nella trasformazione fluida, graduale e senza soluzione di

continuità tra due immagini di forma diversa, che possono essere rappresentati da oggetti, volti, paesaggi) si attiva per creare una superficie liscia, senza soluzione di continuità. Livelli che utilizzano un sistema di coordinate diverso dal progetto sono riproiettati in modo che possano essere posizionati correttamente sul terreno. Editing di base dei layer raster importati, compresi riposizionamento e ritaglio, possono essere eseguiti nel TerraExplorer.

- E' possibile caricare l'intero contenuto dei layer oppure riprodurli tramite streaming, direttamente da un server remoto o tramite un file locale. Quando viene caricato un layer, si è sempre in contatto con la fonte dei dati (locale o remota), in modo da poter facilmente ottenere gli ultimi aggiornamenti dall'origine avendo sempre un livello aggiornato. L'aspetto e il comportamento di tutte le caratteristiche geografiche contenute all'interno del livello possono essere impostate da un apposito menù del software.
- Query spaziali possono essere eseguite in base ad una geometria selezionata o disegnata. Utilizzando l'attributo Table Tool, è possibile cercare e filtrare i dati in un livello basato sulla funzionalità degli attributi. È quindi possibile visualizzare solo i dati filtrati sulla mappa o creare un nuovo livello che include solo questi dati. La nuova tecnologia mesh 3D Layer (3DML), supportato da TerraExplorer Pro, consente agli utenti di visualizzare e interrogare modelli ad alta risoluzione con texture a maglia 3D (3DML). Combinandoli in file ottimizzati per lo streaming, questi modelli offrono una elevata velocità di caricamento ed un basso consumo di memoria hardware (memoria RAM). Ottimizzando tutte le operazioni che tendono a rallentare l'hardware del pc quali: le interrogazioni spaziali (query), le misure complesse, le differenti operazioni di analisi e la riproduzione di un file video sul terreno.
- TerraExplorer fornisce un potente strumento per la creazione e la condivisione di presentazioni di qualsiasi ambiente 3D. In modalità presentazione, è possibile registrare la navigazione attraverso il mondo 3D. I percorsi possono essere creati in maniera più efficiente ed intuitiva utilizzando una delle opzioni flessibili disponibili, tra cui volare attraverso la registrazione di un percorso esatto del terreno, aggiungendo sequenze di punti di controllo (waypoint). Un video in formato AVI può essere creato da qualsiasi presentazione; può essere riprodotto

con un qualsiasi visualizzatore di file video (AVI Viewer). Gli utenti TerraExplorer possono facilmente trovare i dati geografici necessari per un progetto interrogando il tool TerraCatalog, un database che memorizza, organizza e gestisce le connessioni a tutte le fonti di dati, che si trova su un disco locale, in rete, su Oracle o su un server SQL (Structured Query Language).

- In aggiunta al caricamento in un progetto è possibile associare un progetto al TerraCatalog; In questo caso, ogni livello o progetto caricato e tutte le modifiche al progetto stesso vengono aggiornate automaticamente ogni qualvolta si salva.

6.3 Applicazione GIS su Santa Sofia

L'applicazione di sistema GIS allo studio portato avanti su Santa Sofia, dall'Università della Calabria e dall'Università del Messico, ha permesso di inserire su una unica piattaforma geografica i lavori fin qui svolti, evidenziando le seguenti caratteristiche:

- *Completezza*: tutte le analisi possono essere rappresentate geograficamente su uno spazio, avendone ricavato i valori matematici lungo gli assi X,Y,Z (che nel caso di database georiferito sono rappresentati dalle informazioni di latitudine, longitudine ed altitudine);
- *Percettività*: i dati rappresentati consentono l'esplorazione della spazialità e l'analisi multivisuale, così come avviene nella percezione reale, è possibile infatti orientare il modello secondo una data angolazione/altezza in modo da poter enfatizzare particolari altrimenti difficilmente osservabili;
- *Distribuzione*: la collocazione spaziale dei punti di analisi permette una più facile pianificazione delle zone da investigare, in modo da coprire con una buona approssimazione l'intera area di lavoro in modo omogeneo;
- *Monitoraggio*: valutando lo stato di avanzamento dei lavori in qualsiasi momento è possibile correggere la pianificazione degli interventi in base alle evidenze dei risultati in un qualsiasi periodo temporale;
- *Gestione del dato in 3D*: permette dei vantaggi sia di natura metodologica che interpretativa, supportando l'interpretazione con la rappresentazione di relazioni spazio-temporali e analisi multifattoriali; ottimizzando le strategie di analisi ed

indirizzando al meglio l'evoluzione delle attività, Valutando al meglio gli ambiti compatibili con gli interventi pianificati.

6.4 Strutturazione del lavoro

Le analisi svolte su Santa Sofia dal team congiunto Università della Calabria e del Messico da implementate sul GIS 3D sono le seguenti:

- Rilievo Laser Scanner sull'interno e l'esterno.
- Analisi Termografiche dell'interno dell'edificio.
- Caratterizzazione composizionale dei materiali.
- Voli con Drone effettuati per osservare i punti non raggiungibili per evidenziare possibili criticità o approfondire/avvalorare ipotesi.
- Prospezioni georadar (GPR) per lo studio del sottosuolo.
- Inserimento di dati storici relativi ai vecchi interventi di restauro.

La prima sfida del presente lavoro era normalizzare i dati in modo da essere poi riportati nel GIS, annullando possibili errori di proiezione, sovrapposizione e rappresentazione, considerandone la complessità geometrica poiché parte di questi dati erano puntuali (punti di campionamento) e lineari (tracce georadar). Inoltre, i dati da inserire mostravano una estrema diversità di estensione dei file, nello specifico vi erano:

- File video per la termografia e voli da drone;
- File in formato immagine per le foto di campionamento;
- Profili longitudinali per analisi fatte con il georadar;
- Nuvole di punti per l'acquisizione dei dati laser scanner.

Si è provveduto quindi a strutturare un geodatabase cartografico che potesse archiviare la moltitudine di dati e rappresentarli univocamente in uno spazio 3D di facile utilizzo.

La scelta è stata quella di georiferire la nuvola di punti derivante dalle analisi Lidar di tutta Santa Sofia. Grazie all'acquisizione Laser Scanner e al rilievo fotografico mediante Droni è stato possibile ottenere un modello 3D di Santa Sofia realistico, navigabile e di facile ed immediato impatto.

Realizzato il modello tridimensionale dell'edificio si è poi passati alla fase di data-entry (inserimento dati). Purtroppo le analisi che si sono succedute non sono state raccolte con

metodi che permettessero di registrare le coordinate spaziali (latitudine, longitudine, altitudine) e ci si è quindi dovuti basare sulle foto scattate durante le varie analisi.

Le informazioni inserite nel GIS 3D riguardano:

- N° 4 Allineamenti Georadar (Fig. 6.3) realizzati dal Laboratorio de Prospeccion Arqueologica, dell'Instituto de Investigaciones Antropológicas, UNAM (Mexico), per una lunghezza complessiva di circa 113 m. Tutti i profili sono posti al primo piano dell'edificio in corrispondenza dei corridoi ed ad ogni allineamento corrisponde il relativo radargramma.

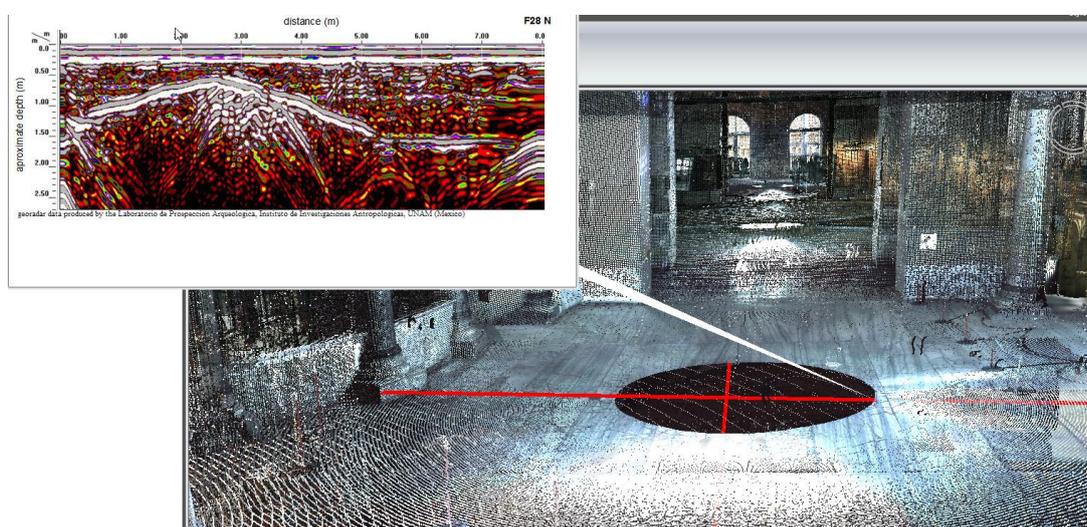


Fig. 6.3. Esempio di traccia georadar posizionata all'interno del database 3D nello spazio xyz.

- N° 36 punti di campionamento (Fig. 6.4) corrispondenti ai campioni prelevati durante le varie campagne di indagine. Per ogni campione è stata inserita la foto del campionamento e le immagini in sezione sottile del campione, sia a nicol paralleli che a nicol incrociati (Fig. 6.4). Per ogni punto di campionamento, inoltre, sono stati caricati i dati relativi alla caratterizzazione composizionale delle malte. I dati inseriti riguardano le caratteristiche chimiche, mineralogiche e petrografiche dei vari campioni (Fig. 6.5). Le analisi sono state svolte dal Dipartimento DiBEST dell'Università della Calabria e salvate in un apposito geodatabase cartografico.

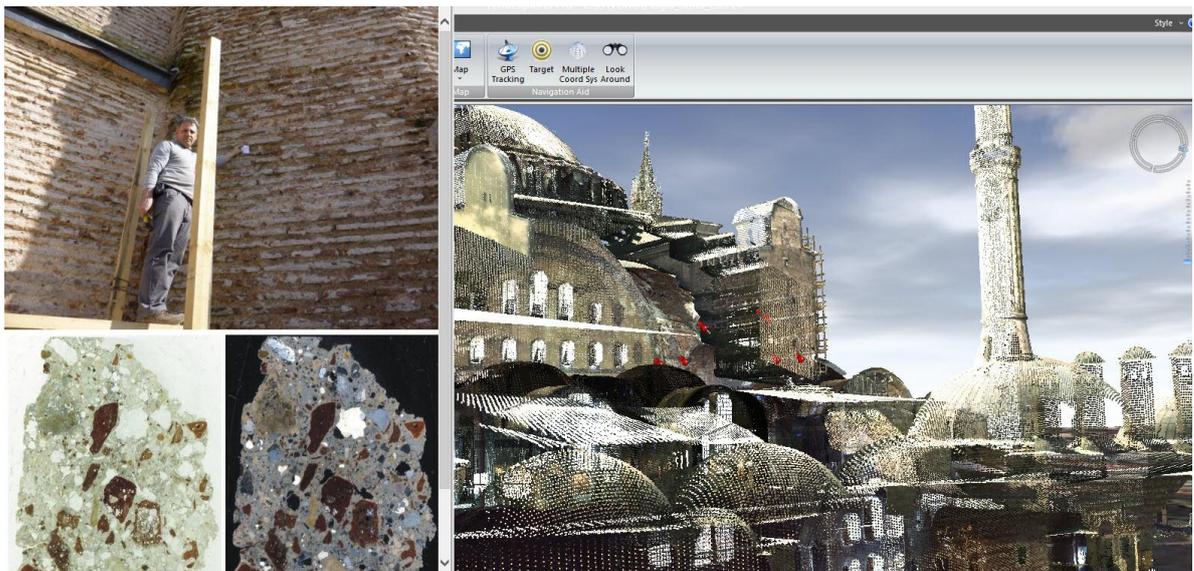


Fig. 6.4. Esempio di posizionamento dei punti di campionamento delle malte.

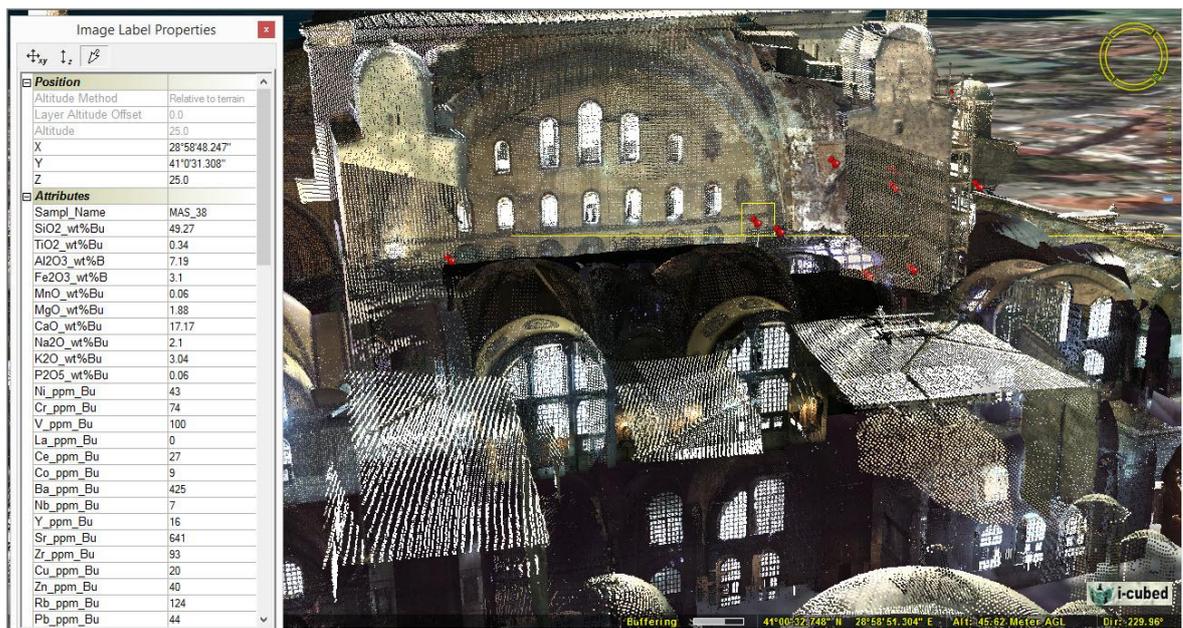


Fig. 6.5. Inserimento dei dati relativi ai campioni di malta analizzati.

- N° 2 prospezioni termografiche raccolte all'interno dell'edificio, sottoforma di filmati, realizzate da "Restructura" in collaborazione con il dipartimento DiBEST. In Fig. 6.6 è riportata la schermata relativa al punto dal quale è stata eseguita l'analisi termografica della cupola, con relativo video.

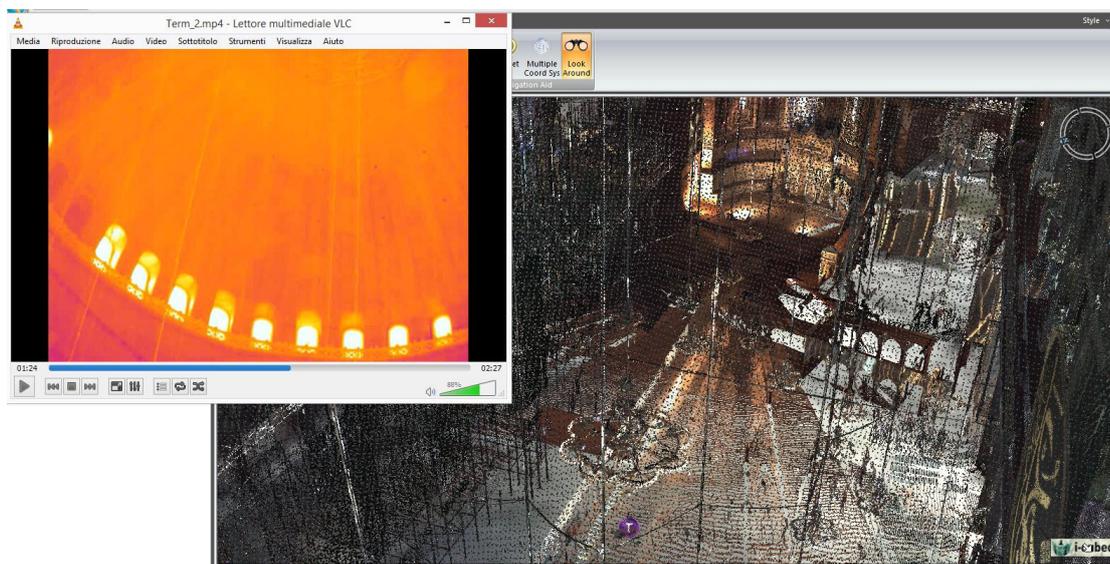


Fig. 6.6. Esempio di caricamento di video termografici all'interno del sistema GIS 3D.

- N° 7 voli effettuati con drone UAV (unmanned aerial vehicle) a sei rotori, sono stati posizionati nei punti di partenza ai vari angoli dell'edificio e racchiudono i video integrali registrati dalla videocamera full HD in dotazione al drone e le immagini riprese (Fig. 6.7).

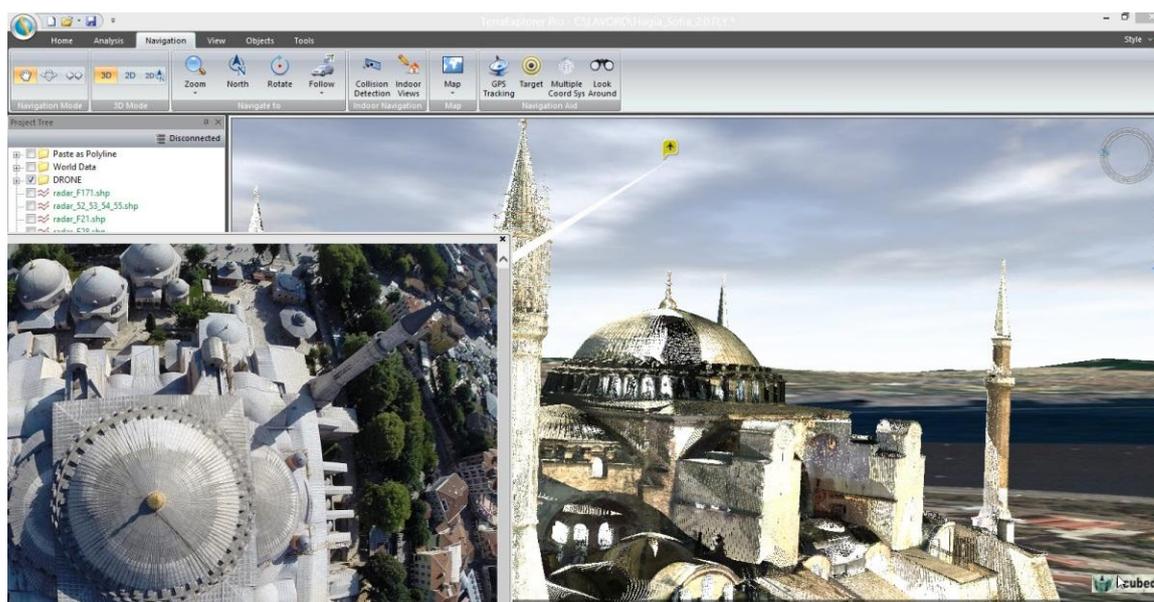


Fig. 6.7. Esempio di caricamento delle immagini, ottenute mediante volo del drone, all'interno del sistema GIS 3D.

- N° 4 suddivisioni della cupola, anch'esse georiferite, che evidenziano le differenti fasi costruttive relative alla volta (Fig. 6.8).
- N°36 interventi di restauro relativi alla cupola e ai pennacchi, realizzati in diverse fasce temporali (Fig. 6.9).



Fig. 6.8. Suddivisioni della cupola che evidenziano le differenti fasi costruttive relative alla volta.

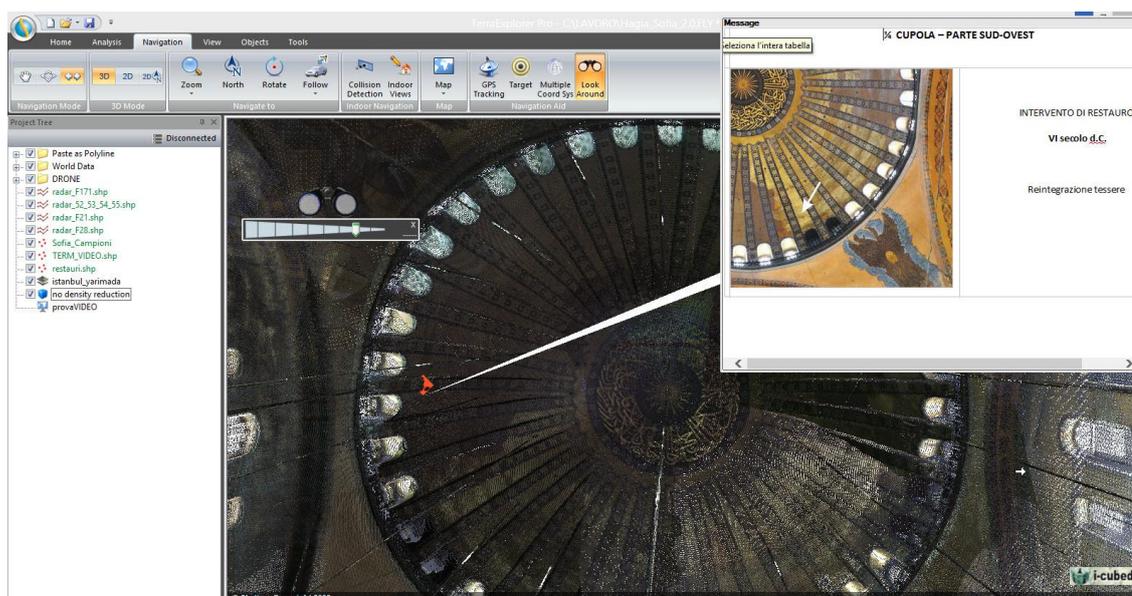


Fig. 6.9. Esempio di caricamento di dati relativi agli interventi di restauro realizzati nel tempo all'interno del sistema GIS 3D.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro può essere considerato un esempio funzionale di approccio multidisciplinare applicato alla diagnostica di un Bene Culturale complesso, da usare come modello per altri casi studio in Turchia e nel Mondo.

Lo studio diagnostico di Santa Sofia ha visto, infatti, l'utilizzo di una serie di metodologie analitiche, ognuna delle quali ha fornito importanti informazioni riguardo alle varie problematiche presenti.

- Dall'interpretazione dei risultati dell'indagine georadar nella navata centrale di Santa Sofia, è evidente che ci sono molte testimonianze architettoniche sepolte a diversi livelli, che suggeriscono la presenza di diverse strutture che si conservano sotto l'attuale piano pavimentale. In particolare, è stato possibile ipotizzare una ricostruzione ipotetica della pianta di un antico edificio, che sembra piuttosto piccolo (22 x 18 m), e dovrebbe essere situato a meno di 2 m di profondità.

Sotto il mosaico di marmo, inoltre, vicino a 2 metri di profondità, è stata identificata una struttura interessante con una riflessione iperbolica limitata da due muri che sembra proseguire in direzione dell'angolo sud-orientale della navata centrale. L'identificazione della struttura sotto il mosaico di marmo suggerisce che esiste una relazione tra di loro e che il mosaico, probabilmente, è stato posizionato lì per segnalare la presenza di un elemento importante, anche se la presenza di un elemento lineare potrebbe anche suggerire una relazione con il sistema di gallerie e canali rilevati da Özkan-Aygün (2006) in altre parti dell'edificio.

- L'incrocio tra le indagini Georadar e le deformazioni dei pavimenti misurati attraverso il Laser Scanner ha consentito di escludere che le deformazioni di Santa Sofia siano correlate alla presenza di strutture disomogenee sepolte nel sottosuolo. Infatti, la carta topografica del piano terra ottenuta dalla scansione laser 3D dell'edificio indica che non ci sono deformazioni o cambiamenti topografici nella superficie pavimentale della

navata centrale. Sebbene, il georadar riveli che c'è almeno un livello di resti architettonici importanti sotto l'attuale pavimento di Santa Sofia, la parte centrale del pavimento è stabile, quasi senza deformazioni, a differenza delle gallerie laterali.

Pertanto, l'ipotesi che le deformazioni di Santa Sofia siano conseguenza della presenza di resti architettonici precedenti sotto il pavimento è stata respinta e queste deformazioni devono essere causate da altri fattori.

Inoltre lo studio georadar ha dimostrato che la sepoltura delle strutture precedenti è stata fatta con estrema cura, utilizzando materiali adeguati ed effettuando una compattazione in modo corretto, il che ha permesso di evitare deformazioni del pavimento.

Per quanto riguarda l'analisi congiunta di tutti gli archi del piano superiore è stata evidenziata la deformazione di tre elementi, anche se risulta necessario un ulteriore approfondimento diagnostico da integrare ai risultati delle indagini qui riportate per confermare le anomalie osservate ed individuare possibili soluzioni tecniche per la conservazione di tali elementi costruttivi.

- Per quanto riguarda l'analisi termica, la campagna di indagine ha permesso di identificare differenze nei materiali e nei metodi costruttivi che hanno scandito l'evoluzione storica di Santa Sofia. Lo studio ha dunque permesso di distinguere le aree oggetto di intervento e gli elementi necessari per la loro distinzione materica, fornendo un contributo alla risoluzione delle questioni relative all'esatto limite degli interventi di ricostruzione del passato.

Dalla distinzione tra le varie tipologie e tra i vari materiali impiegati è stato possibile quindi individuare la delimitazione tra le varie ricostruzioni. Da tali analisi e da quanto riportato in letteratura si può affermare che i mattoni utilizzati per i pennacchi sono stati integrati, per le parti ricostruite dopo il IV secolo, da ricorsi composti da blocchi in pietra squadrata. Le parti ricostruite nel IV secolo non presentano alcun ricorso di materiale diverso. Le parti ricostruite nel X secolo, invece, presentano due ricorsi messi in opera con spessori più sottili. Per le parti ricostruite nel XIV secolo, l'esperienza dei crolli del passato, ha indotto le maestranze ad infittire i ricorsi (in totale 5) ubicandoli

con maggiore rigore costruttivo e con più ampio spessore (il maggiore rigore costruttivo è individuabile dalla scelta di impiegare ricorsi equidistanti di uguale spessore).

Gli archi principali a nord e sud presentano molte variabilità che risultano strettamente connesse agli interventi eseguiti sui pennacchi nel corso dei secoli. Solo alcune delle porzioni degli stessi risultano prive dei ricorsi e quindi omogenee matericamente. Gli archi ad est e ad ovest presentano più contaminazioni materiche, spesso occasionali, ma maggiormente evidenti sull'arco ad ovest rispetto a quello ad est.

Le ispezioni sui *tympana* e sugli archi secondari hanno permesso di individuare la larghezza dell'arco annesso nella stessa muratura. Altresì, hanno dimostrato la presenza e la variabilità dei restringimenti eseguiti nelle finestre con l'impiego di un materiale diverso dal paramento murario che le ospita.

Infine, tale esperienza scientifica ha dimostrato la validità della tecnica di indagine termografica applicata sui monumenti, per l'individuazione e la delimitazione delle fasi costruttive rappresentando un valido strumento di verifica delle ipotesi presenti in letteratura.

- Per quanto riguarda lo studio compositivo delle malte sono state riconosciute con precisione le fasi costruttive del IV, del VI e del X secolo, evidenziando l'esistenza di fasi costruttive o restauri antichi di cui si era persa traccia.

E' stata evidenziata, inoltre, l'esistenza di almeno 4 tipologie composizionali di sabbie provenienti da livelli geologici composizionalmente differenti, utilizzate per la preparazione delle malte. La prima tipologia è quella utilizzata nel IV e nel VI secolo, caratterizzata dall'uso di cocchiopesto misto ad una sabbia costituita prevalentemente da frammenti di derivazione granitica e secondariamente quarzifica, priva di bioclasti e rocce carbonatiche. L'aggregato utilizzato nel X secolo è costituito, invece, da una sabbia più ricca in ortoclasio peritico e mista a frammenti di bioclasti e di calcari criptocristallini. Nella terza tipologia di sabbia, accanto alla componente granitica, è associata una frazione aggregata a base di calcari senza la presenza di bioclasti; mentre nell'ultima accanto alla componente granitica, sono presenti tracce di bioclasti e non si rilevano calcari.

Lo studio composizionale ha inoltre confermato l'importanza delle malte che conferiscono all'intera struttura la capacità di assorbire le sollecitazioni sismiche e le deformazioni, grazie alla presenza delle fasi C-S-H e all'artificio di utilizzare negli impasti più legante rispetto all'aggregato.

- Infine, attraverso questo lavoro, per la prima volta, è stato proposto e creato un modello di database GIS 3D per un Bene Culturale complesso, in cui attualmente confluiscono tutti i dati ottenuti attraverso lo studio diagnostico di Santa Sofia effettuato in questo lavoro. Oltre a questi dati, in futuro potranno essere inserite altre tipologie di informazioni che potranno comunicare tra di loro e potranno essere interrogate.

- I dati sin qui prodotti saranno fondamentali per pianificare nuove campagne diagnostiche e di restauro e potranno essere di aiuto alle autorità preposte alla salvaguardia di Santa Sofia, ottimizzando le modalità e i tempi di intervento.

BIBLIOGRAFIA

- 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.
- Annan A.P, Waller W.M., Strangway DW., Rossiter JR., Redman JD., Watts RD. (1975). The electromagnetic response of a low-loss, 2- layer, dielectric earth for horizontal electric dipole excitation. *Geophysics*, 40: 285-298.
- Avdelidis N.P. e Moropoulou A. (2004). Applications of Infrared Thermography for the Investigation of Historic Structures. *Journal of Cultural Heritage*, 5(1), 119-127.
- Avdelidis N.P., Moropoulou A., Delegou E.T. (2004). A Thermographic Study for the Assessment of Historic Structures. In: *7th Quantitative Infrared Thermography Conference (QIRT)*, Brussels, Belgium: 2004.
- Bakolas A., Biscontin G., Moropoulou A., Zendri E. (1995). Characterization of the lumps in the mortars of historic masonry. *Thermochimica Acta*. 269/270, 809-816.
- Barba L. e Ortiz A. (2001). A Methodological Approach for the Study of Archaeological Remains in Urban Context. *Proceedings of the 32nd International Symposium on Archaeometry*. CD ROM. IIA, UNAM. México.
- Barba L. (2003). The Geophysical Study of Buried Archaeological Remains and the Preservation of the Architectural Patrimony of Mexico City, The CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage 19, The ICOMOS and ISPRS Committee for Documentation of Cultural Heritage, 401-406.

Barba L., Blancas J., Manzanilla L.R., Ortiz A., Barca D., Crisci G.M., Miriello D., Pecci A. (2009). Provenance of the limestone used in Teotihuacan (Mexico): a methodological approach. *Archaeometry*. 51, 525-545.

Barba L., Blancas J., Pecci A., Miriello D., Cura M., Crisci G.M., Cappa M., De Angelis D., Yavuz H. B. (in press). Georadar Study of Early Structures under Hagia Sofia, Istanbul, Turkey. *Proceedings of the 11th International Conference on Archaeological Prospection Warsaw*. 15-19 Sept 2015 (ISAP 2015), Warsaw.

Barca D., Miriello D., Pecci A., Barba L., Ortiz A., Manzanilla L., Blancas G., Crisci G.M. (2013). Provenance of glass shards in archaeological lime plasters by LA-ICP-MS: Implications for the ancient routes from the Gulf of Mexico to Teotihuacan in Central Mexico. *Journal of Archaeological Science*. 40, 3999-4008.

Barilaro D., Branca C., Gresta S., Imposa S., Leone A., Majolino D. (2007). Ground Penetrating Radar (G.P.R.) Surveys Applied to the Research of Crypts in San Sebastiano's Church in Catania (Sicily). *Journal of Cultural Heritage*, 8, 73–76.

Bartoli G. (2001). Hagia Sophia in Istanbul: some remarks on displacement phenomena in main piers. In *Memoria presentata al workshop Hagia Sophia: surveying project conference*.

Batey, R.A. (1987). Subsurface Interface radar at Sepphoris, Israel. *Journal of Field Archaeology*, 14 (1), 1-8.

Bensted J. (1997). *Cement: past, present and future*. Inaugural Lectures Series, University of Greenwich. Dartford Greenwich University Press.

Bensted J. e Coleman N.J. (2004). *La sorprendente storia del cemento e del calcestruzzo dalle origini dell'età della pietra al 1900 d.C. L'industria italiana del cemento 801*, Ed. Gangemi. Roma.

Bevan B.W. (1977). *Ground-penetrating radar at Valley Forge*. Geophysical Survey System, North Salem, New Hampshire.

Bianchini C. e Paolini P. (2003). Rilievo per il restauro e la messa in sicurezza di Hagia Sophia a Istanbul: prime sperimentazioni, *Disegnare: idee immagini*, 26, Gangemi Editore, Roma: 20-31.

Bini M. e Verdiani G. (2006). Il rilievo delle archeologie monumentali: esperienze del laboratorio di rilievo della Sezione Architettura e Disegno di Firenze, in Campana S., Francovich R. (a cura di), *Laser Scanner e GPS, paesaggi archeologici e tecnologie digitali*, Firenze: 107-115.

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

Boynton R.S. (1966). *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*. John Wiley e Sons editore, New York.

Bugini R. e Folli L. (2003). *Lezioni di petrografia applicata*. CNR - Istituto per la Conservazione e la Valorizzazione dei Beni Culturali.

Burrough P.A. (1986). *Principles of Geographic Information Systems for Land Resource Assessment*. Monographs on Soil and Resources Survey. No. 12, Oxford Science Publications, New York.

Cagnana A. e Mannoni T. (2000). *Archeologia dei materiali da costruzione*. Manuali per l'archeologia, a cura di Crogiolo G.P. e Olcese G. Ed. Società Archeologica Padana, Mantova. 123-52.

Çakmak A.Ş., Moropoulou A., Mullen, C.L. (1995). Interdisciplinary study of dynamic behaviour and earthquake response of Hagia Sophia, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 14, 125-133.

Caneva C. (2002). *Restauro e conservazione. Le tecniche diagnostiche: l'endoscopia*, in AA.VV., *Il Mondo dell'Archeologia*, Roma.

Cappa M., De Angelis D., Pecci A., Barba L., Cura M., Crisci G.M., Blancas J., Miriello D. (in press). Thermographic survey at Hagia Sophia (Istanbul - Turkey): main arches, pendentives and tympana. *International Journal of Architectural Heritage*.

Carò F., Riccardi M.P., Mazzilli Savini M.T. (2008). Characterization of plasters and mortars as a tool in archaeological studies: the case of Lardirago Castle in Pavia, Northern Italy. *Archaeometry*. 50, 85-100.

Collepari M. (2003). La lezione dei Romani: durabilità e sostenibilità delle opere architettoniche e strutturali. *Proceeding of III Convegno AIMAT "Restauro e Conservazione dei Beni Culturali: Materiali e Tecniche"*. 3-4 Ottobre Cassino, Italia.

Conyers L.B. (1995). The use of Ground-Penetrating Radar to map the buried structures and landscape of the Ceren Site, El Salvador. *Geoarchaeology*, 10, 275-299.

Conyers L.B. e Goodman D. (2007). *Ground Penetrating Radar. Un'introduzione per gli archeologi* (trad. it. G. Leucci). Aracne editrice, Roma.

Crisci G.M., Davoli M., De Francesco A.M., Gagliardi F., Mercurio P., Miriello D. (2001). L'analisi compositiva delle malte: metodo di studio delle fasi costruttive in architettura. *Arkos*. 4, 36-41.

Crisci G.M., Davoli M., De Francesco A.M., Gagliardi F., Gattuso C., Mercurio P., Miriello D. (2002). L'analisi compositiva delle malte, un valido mezzo per risalire alle fasi costruttive. Risultati preliminari in: *Proceedings of II Congresso Nazionale di Archeometria*, 485-494.

Crisci G. M., Franzini M., Lezzerini M., Mannoni T., Riccardi M.P. (2004). Ancient mortars and their binder. *Periodico di Mineralogia*. 73, 259-268.

Crisci G., Miriello D., Cappa M., De Angelis D., Pecci A., Cura M., Barba L., Blancas J., (2013). Report del Progetto Internazionale. Indagini diagnostiche a Santa Sofia, Istanbul (Turchia). Missione aprile 2013. Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra, Università della Calabria e Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México.

Cura M. (2010). Tani Yontemleri uygulanılarak gerçekleştirilmiş 2002-2003 konservasyon çalışmaları. *Annual of Hagia Sofia Museum* 13, 296-302.

Damiani D., Gliozzo E., Memmi I., Turbanti, I., Spangenberg J. E. (2003). Pigments and plasters discovered in the house of Diana (Cosa, Grosseto, Italy): an integrated study between art history, archaeology and scientific analyses. *Archaeometry*. 45, 341-354.

De Luca R. (2013). Approccio metodologico per lo studio di malte ed intonaci archeologici del Mediterraneo. Tesi di Dottorato in Scienze della Terra, Scuola di dottorato Archimede in Scienze, comunicazione e Tecnologie, Università della Calabria.

De Luca R., Cau Ontiveros M.A., Miriello D., Pecci A., Le Pera E., Bloise A., Crisci G.M. (2013). Archaeometric study of mortars and plasters from the Roman City of Pollentia (Mallorca-Balearic Islands). *Periodico di Mineralogia*, 82, 3, 353- 379.

De Luca R., Miriello D., Pecci A., Domínguez-Bella S., Bernal-Casasola D., Cottica D., Bloise A., Crisci G.M. (2015). Archaeometric Study of Mortars from the Garum Shop at Pompeii, Campania, Italy. *Geoarchaeology*, 30 (4), 330-351.

Di Tondo S. e Verdiani G. (2007). Methodology of 3D digital Survey operations and data processing to architectonic investigations in archaeological area, in *Proceedings of the XXI International Symposium CIPA 2007 AntiCIPAting the future of the cultural past* (Athens, 1-6 October 2007), Athens: 735-738.

Docci M. (2003). Hagia Sophia. Analisi del rilevamento interno, *Disegnare: idee, immagini*, 26, Gangemi Editore, Roma: 32-45.

Doolittle J.A. e Miller W.F. (1991). Use of ground-penetrating radar in archaeological investigations. In *Application of Space-Age Technology in Anthropology Conference Proceedings*. Second Edition. NASA Science and Technology Laboratory, Stennis Space Center, Missisipi.

Elert K., Rodriguez-Navarro C., Sebastian Pardo E., Hansen E., Cazallo O. (2002). Lime mortars for the conservation of historical buildings. *Studies in Conservation* 47. Ed. International Institute for Conservation, London. 62-75.

Erdik M. e Croci G. (2010). Earthquake Performance of Hagia Sophia: a Review of Investigations. *Annual of Hagia Sophia Museum*, 13, 101-134.

Fischer P.M., Follin S.G.W., Ulriksen P. (1980). Subsurface Interface Radar survey at Hala Sukan Tekke, Cyprus. In *Applications of technical devices in Archaeology*. Edited by Fischer P.M.. *Studies in Mediterranean Archaeology* 63, 48-51.

Franquelo M.L., Robador M.D., Ramírez-Valle V., Durán A., Jiménez de Haro M.C., Pérez-Rodríguez J.L. (2008). Roman ceramics of hydraulic mortars used to build the Mithraeum house of Mérida (Spain). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 92, 331-335.

Franzini M., Leoni L., Lezzerini M., Sartori F. (2000). The mortar of the “Leaning Tower” of Pisa: the product of a medieval technique for preparing high-strength mortars. *European Journal of Mineralogy*, 12, 1151-1163.

Geophysical Survey Sistem, Inc. (1987). Operations manual for Subsurface Interface Radar System-3. Manual #MN83-728. Geophysical Survey System, North Salem, New Hampshire.

Giachi G. e Pallecchi P. (2005). La tomba Ildebranda. Materiali costitutivi e stato di conservazione. *Il Patrimonio archeologico di Pitigliano e Sorano. Censimento, monitoraggio, valorizzazione*. Ed. Giardini, Pisa, 119-123.

Goldsworthy H. e Min Z. (2009). Mortar studies towards the replication of Roman concrete. *Archaeometry*, 51, 932-946.

Gotti E., Oleson, J.P., Bottalico L., Brandon C., Cucitore R., Hohlfelder R. L. (2008). A Comparison of the Chemical and Engineering Characteristics of Ancient Roman Hydraulic Concrete with a Modern Reproduction of Vitruvian Hydraulic Concrete. *Archaeometry*, 50, 576-590.

Gros P. (1997). *De Architectura (Vitruvio)*. Traduzione e commento di Antonio Corso e Elisa Romano. Vol. I e II. Giulio Einaudi Editore. Torino.

Güleç A. (1996). Ayasofya Müzesi'nde iklim araştırması: pilot çalışma, III Müzecilik Seminari Bildiriler Kitabı, İstanbul, 24-26 Eylül 1996: 216-232.

Hodgkinson E.S. e Hughes C.R. (1999). The mineralogy and geochemistry of cement/rock reactions: High-resolution studies of experimental and analogue materials. In R. Metcalfe e C. A. Rochelle (Eds.), *Chemical containment of waste in the geosphere* Geological Society, London, 157, 195–211.

Ishizaki T., Sasaki J., Ogura D., Koizumi K., Hidaka K., Plagge R., Grunewald J. (2012). Deterioration and moisture content distribution of inner wall in Hagia Sophia, The Japan Society for the Conservation of Cultural Property 34th, Tokyo.

Iuoni G. (2012). *La termografia nella individuazione di patologie da umidità e ponti termici*, Bergamo.

Jackson M.D., Logan J.M., Scheetz B.E., Deocampo D.M., Cawood C.G., Marra F., Vitti M., Ungaro L. (2009). Assessment of material characteristics of ancient concretes, Grande Aula, Markets of Trajan, Rome. *Journal of Archaeological Science*. 36, 2481-2492.

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

Koizumi K., Ishizaki T., Ogura D., Sasaki J., Hidaka K. (2012). Development of a real-time environmental monitoring system by a wireless sensor network in Hagia Sophia, *Science for Conservation*, 51, 293-302.

Kordatos E.Z., Exarchos D.A., Stravrakos C., Moropoulou A., Matikas T.E. (2013). Infrared thermographic inspection of murals and characterization of degradation in historic monuments, *Construction and Building Materials*, 48, 1261-1265.

Krushkova L.G., Iwaszkiewicz-Wronikowska B., Guidobaldi A.G., Barsanti C. (2009). Santa Sofia di Costantinopoli. L'arredo marmoreo della Grande Chiesa giustiniana. Ed. A. Guiglia Guidobaldi, C. Barsanti, *Cita del Vaticano 2004:[recenzja]*. *Roczniki Humanistyczne*, 56(4), 273-276.

Leckebusch J. (2000). Two- and Three-Dimensional Ground-Penetrating Radar Surveys Across a Medieval Choir: A Case Study in Archaeology. *Archaeological Prospection*, 7, 189-200.

Leckebusch J. (2001). Die Anwendung des Bodenradars (GPR) in der archäologischen Prospektion – 3D-Visualisierung und Interpretation, Rahden.

Leucci G. (2006). Contribution of Ground Penetrating Radar and Electrical Resistivity Tomography to Identify the Cavity and Fractures under the Main Church in Botrugno (Lecce, Italy). *Journal of Archaeological Science*, 33, 1194-1204.

Loker W.M (1983). Recent geophysical explorations at Ceren. In *Archaeology and Volcanism in central America*. Edited by Sheets P.D. University of Texas, Austin, 254-274.

Lorusso S. e Schippa B. (2001). Le metodologie scientifiche per lo studio dei beni culturali. Diagnosi e valutazione tecnico-economica. Pitagora Editrice, Bologna.

Ludwing N. (2002). Tecniche termografiche per la diagnostica sull'edilizia storica. In Castellano A., Martini M., Sibilgia E. *Elementi di archeometria. Metodi fisici per i beni Culturali*. Egea Ed., Milano.

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

Mannara X.P.V. (1993). La termografia computerizzata nell'analisi di strutture di interesse artistico. 6° Congresso Nazionale delle prove non distruttive. Milano.

Mannoni T. e Giannichedda E. (1996). *Archeologia della produzione*. Giulio Einaudi Editore, Torino.

Mark R., Cakmak A. S., Erdik M. (1993). Modelling and Monitoring the Structure of Hagia Sophia in Istanbul. *IABSE REPORTS*, 179-179.

Massazza F. (1988). Pozzolana and Pozzolanic Cements, in P. C. Hewlett, ed., *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 4th ed., Elsevier, New York, 470-635.

Meir I.A., Freidin C., Gilead I. (2005). Analysis of Byzantine mortars from the Negev Desert, Israel, and subsequent environmental and economic implications. *Journal of Archaeological Science*. 32, 767-773.

Meola C., (2007). Infrared thermography of masonry structures. *Infrared Phys Amp Technol*, 49 (3), 228-33.

Milligan R. e Atkin M. (1993). The use of ground-probing radar within a digital environment on archaeological sites. *Computing the Past. CAA92: Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, Aarhus University Press, Aarhus, 21-32.

Miriello D. (2005). Studio petrografico mineralogico e geochimico dei materiali lapidei naturali e artificiali del Castello Svevo di Rocca Imperiale (CS): caratterizzazione e provenienza. Tesi di Dottorato in Scienze della Terra, Università della Calabria.

Miriello D. e Crisci G.M. (2006). The Image analysis and flatbed scanners. A visual procedure in order to study the macro-porosity of the archeological and historical mortars. *Journal of Cultural Heritage*, 7, 186-192.

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

Miriello D., Bloise A., Crisci G.M., Apollaro C., La Marca A. (2011a). Characterisation of archaeological mortars and plasters from Kyme (Turkey). *Journal of Archaeological Science*, 38, 794-804.

Miriello D., Barca D., Crisci G. M., Barba L., Blancas J., Ortiz A., Pecci A., López L. L.; (2011b). Characterization and provenance of lime plasters from the Templo Mayor of Tenochtitlan (Mexico City). *Archaeometry*, 53, 1119-1141.

Miriello D., Bloise A., Crisci G.M, Cau Ontiveros M. Á., Pecci A., Riera Rullan M. (2013a). Compositional analyses of mortars from the late Antique site of Son Peretó

(Mallorca, Balearic Islands, Spain): archaeological implications. *Archaeometry*, 55, 6, 1101-1121.

Miriello D., Barca D., Pecci A., De Luca R., Crisci G.M., López Luján L., Barba L. (2013b). Plasters from different buildings of the Sacred Precinct of Tenochtitlan (Mexico City): characterization and provenance. *Archeometry*, 57, 1, 100-127.

Miriello D., Antonelli F., Apollaro C., Bloise A., Bruno N., Catalano M., Columbu S., Crisci G.M., De Luca R., Lezzerini M., Mancuso S., La Marca M. (2015). A petrochemical study of ancient mortars from the archaeological site of Kyme (Turkey), *Periodico di Mineralogia*, 84, (3A), 497-517.

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

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. (2002). 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., 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. e 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.

Myron Best G. (2003). *Igneous and metamorphic petrology*. Second Edition. Wiley Blackwell Publishing. New York.

Necipoglu G. (1992). The Life of an Imperial Monument: Hagia Sophia After Byzantium, in *Hagia Sophia From the Age of Justinian to the Present* . Ed. by Robert Mark and Ahmet S. Cakmak. Cambridge, 195-225.

Norma UNI 10924 (2001). *Malte per elementi costruttivi e decorativi: classificazione e terminologia*. Ed. UNI (Ente Nazionale Italiano Unificazione), Milano.

Ogura D., Ishizaki T., Koizumi K., Sasaki J., Hidaka K., Kawata K. (2012). Deterioration on the wall and indoor/outdoor environmental conditions in Hagia Sophia, Istanbul, Turkey, *Science for Conservation*, 51, 59-76.

Ogura D., Ishizaki T., Abuku M., Koizumi K., Hidaka K., Hayase A., Sasaki J. (2013). Deterioration on the wall and indoor/outdoor environmental conditions in Hagia Sophia, Istanbul, Turkey (2) - Survey on moisture content profile and thermography and numerical simulation of moisture behavior of the walls, *Science for Conservation*, 52, 27-42,1(3)-1(4).

Oleson J. P., Brandon C., Cramer S.M., Cucitore R., Gotti E., Hohlfelder R. L. (2004). The ROMACONS Project: A contribution to the historical and engineering analysis of hydraulic concrete in Roman maritime structures. *International Journal of Nautical Archaeology*, 33, 99-229.

Oleson J.P., Bottalico L., Brandon C., Cucitore R., Gotti E., Hohlfelde, R. L. (2006). Reproducing a Roman maritime structure with Vitruvian pozzolanic concrete. *Journal of Roman Archaeology*, 19, 29-52.

Olhoeft G.R. (1981). Electrical Properties of rocks. In *Physical properties of rocks and minerals*. Edited by Touloukian Y.S., Judd W.R., Roy R.F., McGraw-Hill, New York, 257-330.

Özkan-Aygün Ç. (2006). The Wells, Subterranean Passage, Tunnels and Water Systems of Hagia Sophia in Istanbul. *Frankfurter elektronische Rundschau zur Altertumskunde*, 1, 35-40.

Özkaya A. e Böke H. (2009). Properties of Roman bricks and mortars used in Serapis temple in the city of Pergamon. *Materials characterization*, 60, 995-1000.

Pallecchi P. (1997). *L'affresco di I stile dell'acropoli di Volterra: considerazioni sulla natura dei materiali e sulla tecnica costruttiva*. Ed. L. Olschki, Firenze.

Pavía S. e Caro S. (2008). An investigation of Roman mortar technology through the petrographic analysis of archaeological material. *Construction and Building Materials*, 22, 1807–1811.

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

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

Pérez-Gracia V., C. ., Osorio R. (2000). GPR Survey to Confirm the Location of Ancient Structures under the Valencian Cathedral (Spain). *Journal of Applied Geophysics*. *Journal of Applied Geophysics*, 43, 167–174.

Raccomandazione NORMAL 3/80 (1980). *Materiali lapidei: campionamento*. Ed. C.N.R.-I.C.R., Roma.

Raccomandazione Normal 1/88 (1988). *Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico*. Ed. CNR - ICR., Roma.

Raccomandazione NORMAL 34/91, (1991). *Analisi dei materiali “Argillosi” mediante XRD*. Ed. C.N.R. - I.C.R., Roma.

Rattazzi A. (2007). *Conosci il grassello di calce? Origine, produzione e impiego del grassello in architettura, nell’arte e nel restauro*. Edicom Edizioni, Manzano.

Riccardi M.P., Lezzerini M., Carò F., Franzini M., Messiga B. (2007). Microtextural and microchemical studies of hydraulic ancient mortars: two analytical approaches to understand pre industrial technology processes. *Journal of Cultural Heritage*. 8, 350-360.

Ricci Lucchi F. (1980). *Sedimentologia Parte 1 - Materiali e tessiture dei sedimenti*. CLUEB Editore, Bologna.

Rosati P. (1992). *Citologia Istologia*. Edi-ermes, Milano, pag. 74-77

Sasaki J. e Hidaka K. (2011). *Mosaics in Hagia Sophia. Documentation and study on material and techniques: report of survey (Vol. 1: Dome mosaic)*, *Journal of Architecture and Planning*, 661, 703-709.

Sasaki J., Yoshida N., Ogura D., Ishizaki T., Hidaka K. (2012). Study of salt crystallization on the inner wall of Hagia Sophia, Istanbul, Turkey, *Science for Conservation*, 51, 303-312.

Sasaki J., Koizumi K., Ogura D., Ishizaki T., Hidaka K. (2013a). Research project on the conservation of Hagia Sophia, Istanbul. Results of environmental monitoring, *Proceedings of Built Heritage 2013 Monitoring Conservation Management, International Conference*, 18-20 November 2013, Politecnico di Milano: 1084-1091.

Sasaki J., Yoshida N., Ogura D., Ishizaki T., Hidaka K. (2013b). Study on the deterioration of the outer wall of Hagia Sophia, Istanbul, Turkey, *Science for Conservation*, 52, 167-180.

Schiele E. e Berens L.W. (1976). *La calce. Calcare, calce viva, idrato di calce*. Ed. Tecniche ET, Milano.

Sellmann P.V., Arcone S.A., Delaney A.J. (1983). Radar profiling of buried reflectors and the groundwater table. *Cold Regions Research and Engineering Laboratory Report*, Hanover Nh, 83 (11), 1-10.

Sersale R. (1991). La storia della calce dall'antichità ai giorni nostri. *Industria italiana del Cemento I, Memoria per invito al 7th International Lime Congress*. *Industria italiana del Cemento*, 65, 1 Ed. A.I.T.E.C. Pubblicità, Roma 56-62.

Silva D.A., Wenk H.R. Monteiro P.J.M. (2005). Comparative investigation of mortars from Roman Colosseum and cistern. *Thermochimica Acta*, 438, 35-40.

Silva J., De Brito J., Veiga R. (2009). Incorporation of fine ceramics in mortars. *Construction and Building Materials*, 23:556-564.

Stark J. e Wicht B. (1999). Zur Historie des Gipses. *ZKG (Zement, Kalk, Gips)*. Ed. Bauverlag Weisbaden Alemagne, 52 (10), 527-533.

Taddei A. (2013). La decorazione musiva aniconica della Santa Sofia di Costantinopoli da Giustiniano all'età mediobizantina: alcune osservazioni. *Vie per Bisanzio*, 373-382.

Takayama H., Hidaka K., Muramoto M., Kikuchi Y. (2001). Monitoring and bio-deterioration of Hagia Sophia, Hagia Sophia Surveying Project Conference, March 20, 2001, Tokyo: proceedings of the conference, Hagia Sophia Surveying Project, Japan: 91-108.

Taylor H.F.W. (1964). *The Chemistry of Cements*, Academic press, London.

Taylor, H.F.W. (1997). *Cement chemistry*, 2nd ed. Thomas Telford, London, pp. 113-128.

Teteriatnikov N. (1998). *Mosaics of Hagia Sophia, Istanbul: the Fossati restoration and the work of the Byzantine Institute*. Dumbarton Oaks research library and collection.

Van Nice R.L. (1965). *St Sofia in Istanbul: An Architectural Survey*. Dumbarton Oaks Center for Byzantines Studies Trustees for Harvard University, Washington D.C.

Vendrell-Saz M., Alarcón S., Molera J., García-Vallés M. (1996). Dating ancient lime mortars by geochemical and mineralogical analysis. *Archaeometry*. 38, 143-149.

Wentworth C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments, *Journal of Geology*. 30, 377-392.

Wenzel F. e Duppel C. (2010). Investigations into the construction and repair history of the Hagia Sophia, Ayasofya Muzei yilligi. *Annual of Hagia Sofia Museum*, 13, 177-192.

Yamaoka K., Hidaka K., Hara T. (2011). Structural dynamic behaviors of Hagia Sophia, *Proceedings of the World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (18-23 September, 2011)*, Korea.

Yilmaz O. e Eser M. (2005). Ground-Penetrating Radar Surveys at the Faith Mosque and the Church of St. Sophia, Istanbul. *75th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 24, 1125–1128.

Yilmaz O. (2013). Geophysical Investigations of Historic Buildings-A Case Study of the Great Church of St. Sophia. *The Leading Edge*, 32 (3), 292.

RINGRAZIAMENTI

Desidero esprimere la mia riconoscenza nei confronti di tutti coloro che hanno creduto in questo progetto e che hanno collaborato per la sua realizzazione.

Si ringraziano la Direzione del Museo di Santa Sofia (Ayasofya Müzesi) nelle persone del Direttore Hayrullah Cengiz, dell'ex vicedirettore Sefer Arapoğlu e dell'attuale vicedirettore Ömer Severoğlu, nonché le dott.sse Bilgen Deveci, Defne Tekay e Sabriye Karahan Parlak per il loro supporto e l'ospitalità.

Il Ministero della Cultura e del Turismo della Repubblica Turca per i permessi accordandoci per l'esecuzione delle ricerche.

La FLIR Systems Inc. per aver fornito la strumentazione necessaria al rilievo termografico.

La Fabbrica Italiana Droni ed in particolare il dott. Mirco Taranto, il dott. Tullio Iaria, Gabriele Ascenti e il dott. Prashant Bhardwaj per aver fornito il drone utilizzato per le riprese aeree.

Si ringrazia inoltre Restructura ed in particolare l'ing. Marco Cappa e l'ing. Daniela De Angelis, per i rilievi e le elaborazione delle immagini termiche.

Il dott. H. Bora Yavuz della Leica, per il suo contributo al rilievo 3D.

Un particolare ringraziamento va al mio supervisore, prof. Gino Mirocle Crisci, e ai miei co-tutor, prof. Luis Alberto Barba Pingarrón e dott. Domenico Miriello, nonché agli altri membri dell'equipe di ricerca: la dott.ssa Alessandra Pecci, il dott. Andrea Bloise, il prof. Antonio La Marca, il dott. Jorge Blancas, il dott. Agustin Ortiz Butron e il dott. Ceyhun Katilt.

Grazie anche ai tecnici dei laboratori del Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra (DiBEST) dell'Università della Calabria, in particolare al dott. Mariano Davoli, il dott. Giancarlo Niceforo e la dott.ssa Ida Daniela Perrotta.

Grazie anche al dott. Antonio Vescio e alla dott.ssa Raffaella De Luca per aver contribuito all'editing del presente lavoro.