CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

Tesi di Laurea Magistrale

MATERIALI LAPIDEI FIORENTINI: CARATTERIZZAZIONE DELLA PIETRA BIGIA

Relatore:

Prof.ssa Paola Marini

Candidata:

Arianna Valentini

Correlatore:

Matricola: s316642

Fabio Fratini

Luglio 2025

ABSTRACT

La seguente tesi presenta lo studio condotto per la caratterizzazione della Pietra Bigia, pietra ornamentale impiegata storicamente nell'architettura fiorentina. L'elaborato si articola in due sezioni principali: la prima di natura introduttiva, storica e descrittiva, la seconda dedicata all'indagine sperimentale condotta sulla Pietra nel laboratorio del Politecnico di Torino ed in situ, ovvero nelle ex cave di estrazione e nel centro cittadino di Firenze.

L'introduzione fornisce una panoramica generale sulle pietre ornamentali, con particolare attenzione alle rocce sedimentarie e, in particolare, alle arenarie, gruppo litologico cui appartiene la Pietra Bigia.

Lo studio procede con l'approfondimento sulle caratteristiche generali e petrografiche delle principali arenarie fiorentine, quali la Pietra Serena e la Pietraforte, analizzandone anche l'impiego storico-architettonico nella città.

Sulla base di fonti storiche e bibliografiche, sono state individuate le cave, ad oggi inattive, da cui in passato si estraevano Pietra Serena e Pietra Bigia. Si riportano i sopralluoghi effettuati con documentazione fotografica; dalle cave storiche sul Monte Ceceri, in prossimità di Fiesole (Firenze), sono stati prelevati campioni di Pietra Bigia. Tali campioni sono stati poi osservati e studiati nel laboratorio del Politecnico di Torino e successivamente tagliati in cubi di lato 50mm per l'esecuzione delle prove.

A completamento di questa parte storica-descrittiva, vengono presentati brevemente alcuni degli edifici storici fiorentini, osservati durante il sopralluogo nel centro storico, in cui è stato identificato l'uso della Pietra.

La seconda parte della tesi si propone di descrivere le prove di laboratorio eseguite sui campioni raccolti. Fin da subito è stata riscontrata visivamente una differente granulometria tra i campioni prelevati.

Sono state realizzate sezioni sottili dei campioni, sia della tipologia a grana fine che di quelli a grana visivamente più grossa, e successivamente è stata eseguita l'analisi petrografica secondo la norma EN 12407:2019, "Metodi di prova per pietre naturali – Esame petrografico".

Sono stati quindi applicati i seguenti "Metodi di prova per pietre naturali":

-Esame petrografico, secondo UNI EN 12407:2019;

-Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici, secondo UNI EN 14579:2004;

- Determinazione dell'assorbimento d'acqua a pressione atmosferica, secondo UNI EN 13755:2008;

-Determinazione della resistenza alla cristallizzazione dei Sali, secondo UNI EN 12370:2020.

Durante il sopralluogo a Firenze, sono state condotte prove in situ, tra cui la misura degli impulsi ultrasonici (UNI EN 14579:2004) e l'utilizzo della termocamera, al fine di confrontare le proprietà dei materiali in opera con quelle dei campioni di cava studiati in laboratorio.

I dati ottenuti consentono una caratterizzazione piuttosto completa della Pietra Bigia, permettendo un confronto diretto con la Pietra Serena, di cui rappresenta una variante locale e di cui, da letteratura abbiamo numerose informazioni. Le conclusioni della tesi forniscono una valutazione sullo stato di conservazione della Pietra Bigia negli edifici storici, evidenziando similitudini e differenze rispetto alla Pietra Serena.

ABSTRACT

This thesis presents the study conducted for the characterization of Pietra Bigia, an ornamental stone historically used in Florentine architecture. The work is divided into two main sections: the first provides an introductory, historical, and descriptive framework; the second is dedicated to the experimental investigation carried out on the stone, both in the laboratory of the Politecnico di Torino and in situ, namely in the former extraction quarries and in the historic center of Florence.

The introduction offers a general overview of ornamental stones, with particular focus on sedimentary rocks and, specifically, sandstones, the lithological group to which Pietra Bigia belongs. The study then delves into the general and petrographic characteristics of the main Florentine sandstones, such as Pietra Serena and Pietraforte, also analyzing their historical and architectural use in the city.

Based on historical and bibliographic sources, the now-inactive quarries from which Pietra Serena and Pietra Bigia were once extracted were identified. Site visits, supported by photographic documentation, were carried out; samples of Pietra Bigia were collected from the historic quarries on Monte Ceceri, near Fiesole (Florence). These samples were then examined and studied in the laboratory of the Politecnico di Torino and subsequently cut into 50 mm cubes for testing.

To complement this historical-descriptive section, some Florentine historical buildings where Pietra Bigia was identified were briefly presented, based on observations during the on-site survey in the historic city center.

The second part of the thesis focuses on laboratory tests carried out on the collected samples. From the outset, a visible variation in grain size among the samples was observed. Thin sections were prepared, both from fine-grained and coarser-grained samples, followed by petrographic analysis according to EN 12407:2019 (Natural stone test methods – Petrographic examination).

The following natural stone test methods were applied:

- Petrographic examination (UNI EN 12407:2019);
-Determination of the velocity of propagation of ultrasonic pulses (UNI EN 14579:2004);
-Determination of water absorption atmospheric pressure (EN 13755:2008);
-Determination of resistance to salt crystallization (UNI EN 12370:2020).

During the survey in Florence, in situ tests were also conducted, including ultrasonic pulse velocity measurements (UNI EN 14579:2004) and thermographic analysis, in order to

compare the properties of materials in existing structures with those of the quarry samples analyzed in the laboratory.

The results provide a rather comprehensive characterization of Pietra Bigia, allowing for a direct comparison with Pietra Serena, which is considered a local variant and is extensively documented in the literature. The thesis concludes with an assessment of the conservation state of Pietra Bigia in historic buildings, highlighting similarities and differences with Pietra Serena.

Sommario

Introduzione 1
1. Le Pietre Ornamentali 4
La classificazione scientifica dei materiali lapidei 5
Criteri per la denominazione 8
Criteri di qualità: aspetti estetici e fisico-meccanici 9
Normative europee di riferimento 12
1.1. Le rocce sedimentarie 15
1.2. Le arenarie 19
1.3. Le arenarie toscane 22
1.4. Sopralluoghi nelle cave storiche e nel centro storico di Firenze 37
2. Metodi e applicazioni 63
2.1. Campioni di Pietra Bigia 64
Campione #1 64
Campione # 2 65
Campione #3 66
Campione #4 67
Campioni dalla Cava Poggio a' Grilli di Tavarnuzze 68
2.2. Prove eseguite in laboratorio 68
Esame petrografico 68
Determinazione della velocità di propagazione del suono 69
Determinazione dell'assorbimento d'acqua a pressione atmosferica 75
Determinazione della resistenza alla cristallizzazione dei Sali 76
3. Risultati 78
Esame petrografico 78
Determinazione della velocità di propagazione del suono 84
Determinazione dell'assorbimento d'acqua a pressione atmosferica 92
Determinazione della resistenza alla cristallizzazione dei Sali 92
3.1 Confronto tra Pietra Bigia e Pietra Serena 102
Conclusioni 106
Bibliografia 108
Appendici 111
Appendice A 111
Campione #1 111
Campione #2 112

Campione #3 112
Campione#4 113
Appendice B 114

Introduzione

Culla del Rinascimento e simbolo universale dell'arte, Firenze si distingue da secoli per il suo straordinario patrimonio artistico ed architettonico. Gli edifici ed i monumenti della città sono in gran parte realizzati con i litotipi locali; non soltanto i celebri marmi raccontano la storia di Firenze ma anche la Pietra Serena e la Pietraforte, selezionate per la loro lavorabilità e resistenza, sono protagoniste indiscusse tra le arenarie cittadine.

Sebbene meno nota, la Pietra Bigia, varietà della Pietra Serena, è stata altrettanto impiegata e diffusa in passato nella realizzazione degli elementi strutturali e decorativi nel centro storico di Firenze, spesso in combinazione con le due più note.

Nel corso dei secoli, queste pietre hanno conservato la memoria di ciò che è stato; tuttavia, non immuni allo scorrere del tempo e alle crescenti pressioni ambientali legate al contesto cittadino in cui risiedono (inquinamento atmosferico, variazioni climatiche, fenomeni di degrado chimico-fisico, graffiti vandalici), subiscono diversi processi di deterioramento che mettono a dura prova la resistenza del materiale.

Infatti, come tutte le pietre impiegate nel costruito storico e non solo, anche la Pietra Bigia subisce l'avanzare del tempo ed i fenomeni di degrado ed i processi di invecchiamento che esso comporta, amplificati dal contesto urbano in cui risiede.

Il degrado (o alterazione) delle rocce può essere definito come il "risultato dell'interazione tra le proprietà fisiche e meccaniche del materiale lapideo, le condizioni ambientali (temperatura, vento, umidità e inquinanti atmosferici) in cui esso è collocato e le modalità di posa in opera" (Marini, 2025).

Di fatto, le pietre utilizzate per la realizzazione di monumenti ed edifici, sono costantemente esposte all'azione di agenti esterni (atmosferici, climatici o biologici) che possono modificarne le caratteristiche originarie, sia in senso estetico, con alterazioni cromatiche, formazione di muffe, licheni o macchie superficiali che in senso meccanico-strutturale, con fenomeni di decoesione, alveolizzazione (formazione di cavità), perdita di materiale, alterazione biologica, disgregazione e microfratture o fratture che possono compromettere la stabilità e la sicurezza degli edifici.

I principali fattori passivi (relativi al materiale) che influenzano il degrado, sono la composizione mineralogica, la tessitura della roccia, le tecniche di estrazione e di lavorazione e la modalità di posa in opera (Marini, 2025).

Tra i fattori attivi (ambientali) si tengono in considerazione: il clima (pioggia, nebbia, gelo, vento), l'inquinamento atmosferico (con apporto di particolato ed anidride solforosa) e l'anidride carbonica (Marini, 2025). Tali fattori determinano sinergicamente quella che sarà la durabilità della roccia.

Tra i principali meccanismi di alterazione possono essere citati: la cristallizzazione salina all'interno della porosità apparente, la disgregazione granulare provocata dai cicli gelo-disgelo, l'accumulo di particolato atmosferico e l'interazione con i gas presenti nell'atmosfera urbana (come SO_2, NO_x e CO_2), che facilita la formazione di croste nere, e la colonizzazione biologica (licheni, alghe, biofilm) in condizioni di elevata umidità e bassa ventilazione.

In tale contesto, diventa perciò imprescindibile studiare le caratteristiche chimico-fisiche e le vulnerabilità di tali pietre ornamentali al fine di definire strategie efficaci di tutela e valorizzazione; ed in tale contesto si inserisce il seguente studio.

Con l'analisi e la caratterizzazione della Pietra Bigia ed il suo confronto con la più nota e ampiamente studiata Pietra Serena, si vuole contribuire all'ampliamento delle conoscenze scientifiche sui materiali lapidei storici. L'obiettivo è quello di fornire dati utili nel contesto del restauro (secondo il "primo assioma brandiano: "si restaura solo la materia dell'opera d'arte" (Bargossi et al., 2008)), della conservazione e della valorizzazione del patrimonio storico-culturale, testimonianza significativa dell'identità collettiva e culturale della città stessa. Pensiero condiviso e sostenuto da uno dei maggiori studiosi della "città storica", Lewis Mumford, secondo il quale "la città rappresenta il luogo dove, per virtù dell'arte, si sono raffreddate e solidificate le vite degli uomini, imprimendo forma durevole a momenti che sarebbero svaniti, altrimenti al pari degli uomini. "Nella città il tempo diventa visibile: gli edifici e le strade sono l'evidenza delle stratificazioni temporali di ogni singola generazione" (Bargossi et al., 2008).

Lo studio dell'arenaria fiorentina è stato condotto sia in situ, attraverso sopralluoghi nelle cave storiche, ormai inattive, e nel centro storico di Firenze, con l'ausilio della termocamera e la misura degli impulsi ultrasonici nella roccia, sia in laboratorio, presso il Politecnico di Torino, con l'esecuzione di una serie di prove, sia distruttive che non, secondo le normative di riferimento, come sarà ampiamente descritto in seguito.

I campioni rappresentativi, su cui sono state fatte le prove, sono stati recuperati dalla cava di estrazione, ad oggi inattiva, situata sul Monte Ceceri, in prossimità di Fiesole (Firenze), dove in passato venivano estratte le arenarie del Macigno (Pietra Serena e Bigia).

È importante sottolineare la complessità nel riprodurre in laboratorio, in modo artificiale, l'azione sinergica dei processi di degrado, che nella realtà agiscono simultaneamente e sono influenzati da diverse variabili. I test di invecchiamento accelerato condotti, permettono tuttavia, di valutare in maniera apprezzabile la durabilità dei materiali.

1. Le Pietre Ornamentali

Le Pietre Ornamentali rappresentano una risorsa naturale di straordinario pregio, non solo per il loro elevato valore commerciale, ma anche per il ruolo essenziale che rivestono nella conservazione e valorizzazione del patrimonio artistico e monumentale, come già anticipato.

Esse comprendono tutte quelle rocce che, grazie alle loro caratteristiche pregiate e alla loro unicità, trovano impiego sia in campo edile-monumentale che nel design.

L'Italia è un paese di antichissime tradizioni estrattive risalenti all'epoca greco-romana. Tali tradizioni si sono conservate e protratte nel tempo, ancora oggi la produzione italiana di materiali lapidei raggiunge i primi posti, in particolare per i marmi, i calcari da taglio ed i travertini, con circa "8,5 milioni di tonnellate annue complessive" (Facoltà di Ingegneria, s.d.). La capacità produttiva delle imprese italiane si è talmente sviluppata negli anni da riuscire a coprire la produzione di materiali importati da tutto il mondo; il valore unitario di mercato delle pietre ornamentali è così elevato da rendere trascurabile il costo del trasporto, facilitandone, dunque, il commercio a livello internazionale.

Le caratteristiche principali affinché queste risultino un prodotto facilmente commerciabile e di pregio, sono basate sull' aspetto estetico, alla facilità di lavorazione e alle caratteristiche tecniche di buona prestazione (Facoltà di Ingegneria, s.d.).

Tali pietre ricoprono un ruolo importante nella località di estrazione, sia a livello socioculturale, diventando simbolo identificativo della regione, che a livello economico-produttivo per lo sviluppo di realtà imprenditoriali locali (Regione Piemonte, n.d.).

Inoltre, ad oggi, l'attività di restauro inizia a prediligere, non più i materiali esteticamente simili ma, laddove possibile, l'utilizzo di pietre uguali alle originarie, provenienti dal medesimo sito estrattivo, in quantità limitate ma sufficienti, abbinando, talvolta, un'operazione di recupero ambientale dei siti spesso abbandonati.

D'altra parte, in questi ultimi anni, attraverso l'introduzione di leggi e vincoli paesaggistici nel quadro legislativo nazionale e regionale, si è cercato, giustamente, di salvaguardare il paesaggio, le falde idriche e gli abitati cittadini, tendendo ad ostacolare l'apertura di nuove cave e la produzione dei lapidei (Facoltà di Ingegneria, s.d.).

Tale crescente attenzione risulta coerente data la natura del territorio italiano: paese ad alta densità abitativa, con flussi turistici importanti e costanti durante tutto l'anno e con una conformazione geologica e geodinamica, che, ad eccezione di qualche località,

risulta relativamente giovane, condizionata principalmente dalla tettonica alpina, in cui prevalgono i rilievi montuosi e le formazioni sono spesso interrotte da faglie, fratture ed erosioni (Facoltà di Ingegneria, s.d.).

Queste discontinuità geologiche e l'intensa attività tettonica in Italia, oltre a costituire un fattore di rischio, condizionano notevolmente il processo di produzione delle rocce ornamentali, aumentandone la fratturazione e influenzando la potenza degli orizzonti rocciosi (ovvero lo spessore verticale utile di uno strato roccioso continuo) direttamente in cava.

È di fondamentale importanza, dunque, che l'attività estrattiva delle pietre ornamentali, rispetti i vincoli di legge ed i criteri di ottimizzazione ambientale sia in fase di esercizio che in fase di recupero, per minimizzare gli impatti negativi e le profonde modificazioni del territorio (eliminazione della copertura vegetale, scavi di notevoli entità, cumuli di materiali di scarto e discariche, variazioni dell'idrografia ecc. (Facoltà di Ingegneria, s.d.)) le cui implicazioni, se trascurate, possono provocare danni irreversibili, talvolta più gravi dei vantaggi ottenuti.

L'uso di tali risorse deve essere moderato, affinché non si verifichi un depauperamento del territorio. Le riserve minerarie non sono illimitate ed i tempi necessari al loro rinnovamento sono notevolmente più lunghi rispetto a quelli con cui vengono potenzialmente consumate.

Risultano auspicabili, dunque, uno sfruttamento razionale affiancato da processi di riciclaggio più intensi e diffusi, definiti e supportati anche da scelte economiche e politiche sostenute da una conoscenza approfondita dell'origine e distribuzione delle pietre ornamentali stesse (Facoltà di Ingegneria, s.d.).

La classificazione scientifica dei materiali lapidei

Le pietre ornamentali sono pietre naturali, che si distinguono tra loro a partire dai diversi fenomeni di formazione, che ne determinano l'intima tessitura e struttura, e dai fenomeni successivi alla loro genesi, quali l'evoluzione geologica subita (seppellimento, deformazione, erosione), l'intensità e la durata degli eventuali fenomeni collaterali di natura chimico-fisica (cementificazione, dissoluzione, compattazione, alterazione, fratturazione ecc.) (Di Sivo, 2004).

Data la loro varietà e molteplicità, è necessario un sistema di denominazione standardizzata.

La norma europea UNI EN 12670:2019, intitolata "Pietre naturali-Terminologia", pone le basi terminologiche per la classificazione e le definizioni geologiche e petrografiche delle pietre naturali. Nel documento viene stabilita la terminologia per termini scientifici e tecnici, metodi di prova, prodotti e classificazione delle pietre negli ambiti della geologia, estrazione, lavorazione, commercializzazione e prodotti finiti. Laddove non esista il nome per una certa varietà di pietra, questa viene identificata attraverso i suoi tre principali componenti mineralogici (UNI EN 12670:2019).

La norma suddivide le rocce in tre grandi categorie fondamentali in base ai diversi processi di formazione: rocce ignee (o magmatiche), rocce sedimentarie e rocce metamorfiche.

Le rocce presenti in superficie in maggiore quantità, seppur con spessori relativamente ridotti, sono quelle sedimentarie (circa il 75%); tuttavia, considerando l'intero spessore della crosta terrestre, la loro incidenza complessiva risulta piuttosto bassa (circa il 5%) rispetto a quella delle rocce ignee di tipo granitico, seguite da quelle metamorfiche (Facoltà di Ingegneria, s.d.).

Rocce magmatiche (o ignee)

Le rocce magmatiche si originano per consolidazione (solidificazione) dovuta al raffreddamento del magma allo stato fuso. A seconda della profondità a cui avviene il processo e della velocità di raffreddamento si distinguono in:

- rocce intrusive (o plutoniche), si formano a grandi profondità e in tempi lunghissimi (da centinaia di migliaia a milioni di anni), ad alta pressione e senza perdita degli elementi volatili; queste condizioni portano alla formazione di cristalli visibili ad occhio nudo (Facoltà di Ingegneria, s.d.); nella UNI EN 12670:2019 sono classificate con il diagramma QAPF (Q, quarzo; A, feldspato alcalino; P, plagioclasio; F, feldspatoide), in base alla percentuale relativa delle fasi mineralogiche presenti e rilevabili attraverso microscopio ottico.
- rocce effusive (o vulcaniche), si formano in superficie, per risalita del magma attraverso le fratture della crosta terrestre; ciò comporta un rapido raffreddamento e un abbassamento di pressione con conseguente liberazione delle componenti volatili del magma; presentano pochi cristalli visibili ad occhio nudo, non sviluppati pienamente ed

immersi in matrice microcristallina e di vetro vulcanico (Facoltà di Ingegneria, s.d.); nella UNI EN 12670:2019 sono classificate tramite il diagramma TAS, in base al contenuto chimico in silice e alcali, rilevabili attraverso la fluorescenza a raggi X.
- rocce ipoabissali e sub-vulcaniche, si formano a profondità non elevate e rappresentano una tipologia intermedia delle precedenti.
Dunque, a parità di composizione chimica del magma di partenza, questi processi di formazione danno vita a rocce con strutture profondamente diverse. Di seguito sono riportate le principali rocce intrusive ed effusive caratterizzate da un tenore in silice decrescente (Facoltà di Ingegneria, s.d.):

- Granito, granodiorite, tonalite, sienite,diorite, gabbro, peridotite;
- Riolite, dacite, quarzoandesite, trachite, andesite, basalto, picrite.

Rocce metamorfiche

Le rocce metamorfiche derivano dalla trasformazione mineralogica e strutturale, allo stato solido, di rocce preesistenti sottoposte a variazioni di temperatura, pressione e composizione chimica (Facoltà di Ingegneria, s.d.). Si distinguono vari tipi di metamorfismo:
-di contatto, quando rocce preesistenti vengono a contato con intrusioni magmatiche molto più calde (variazione di temperatura);
-dislocazione, quando si creano forti pressioni per movimenti tettonici (faglie e sovrascorrimenti) con conseguente frantumazione localizzata della roccia, senza lo sviluppo di fenomeni di ricristallizzazione;
-dinamotermico, quando, per fenomeni di orogenesi e di natura tettonica, le placche terrestri sono spinte in profondità subendo importanti variazioni di temperatura e pressione, sia per la profondità che per l'attrito al movimento (fenomeno che per natura, interessa vaste aree);
-seppellimento, quando per rapida subsidenza (sprofondamento) ed elevata sedimentazione di vaste aree (scala regionale), si hanno elevate pressione ed un aumento di temperatura (Facoltà di Ingegneria, s.d.).
Le rocce metamorfiche possono presentare strutture ricristallizzate (es. nei marmi) o fratturate senza ricristallizzazione (es. miloniti) e tessiture (disposizione ed orientamento dei cristalli) variabili: isotrope, senza orientazioni preferenziali, tipiche in quelle di contatto, oppure orientate, a causa delle forti pressioni che le rocce di

seppellimento e dinamotermiche subiscono durante il processo di formazione (Facoltà di Ingegneria, s.d.).
La nomenclatura in uso si basa sul protolito (composizione chimica e caratteristiche strutturali e mineralogiche della roccia di partenza), tipo, intensità e durata del fenomeno di metamorfismo, mineralogia e tessitura (orientazione e scistosità) (Di Sivo, 2004).

Dato l'argomento principale della presente tesi, le rocce sedimentarie saranno trattate con maggior dettaglio e approfondimento nella sezione *1.1. Le rocce sedimentarie*.

Criteri per la denominazione

Nel settore lapideo, la denominazione commerciale delle rocce ornamentali non coincide con la denominazione suggerita dalla classificazione scientifica. I nomi commerciali sono spesso di fantasia e formulati per risultare più accattivanti in termini di marketing, tanto da essere utilizzati, alle volte, per rilanciare e promuovere nuovamente materiali già presenti sul mercato.
La denominazione commerciale o tradizionale proviene da un linguaggio popolare o dei cavatori stessi e nella maggior parte dei casi, prima che venissero redatte norme che stabilissero una denominazione regolamentata e standardizzata, i materiali lapidei venivano classificati e nominati secondo criteri quali: il colore e/o altre caratteristiche naturali, la località di provenienza (spesso inesatta) o addirittura il nome del proprietario della cava, creando difficoltà nell'identificare con chiarezza i materiali e creando "equivoci in sede di definizioni contrattuali e capitolati d'appalto" (Di Sivo, 2004).
Nonostante non fornisca informazioni geologiche, litologiche o geografiche esatte, la denominazione commerciale continua ad essere riportata in studi e pubblicazioni tecniche poiché ampiamente diffusa, nota e consolidata nell'uso.
La norma UNI EN 12440:2017, intitolata "Pietre naturali -Criteri per la denominazione", elaborata dal Comitato Tecnico CEN/TC 246 "Pietre naturali", si pone come obiettivo quello di "unificare i criteri di denominazione delle varietà di pietra naturale, mantenendo i nomi tradizionali e introducendo termini relativi alla natura petrologica, al colore tipico e al luogo di origine della pietra" (UNI EN 12440:2017).
Secondo tale norma, la denominazione delle pietre naturali è data da:

- nome tradizionale o commerciale: da evitare i nomi con riferimenti geografici di provenienza inesatti e nomi di aziende;

-famiglia/gruppo petrologico: secondo la UNI EN 12670:2019 “nome scientifico della roccia, ottenuto tramite esame petrografico” ovvero la “descrizione e classificazione delle rocce attraverso l’analisi dell’origine, della struttura e del contenuto mineralogico, ad esempio con microscopio polarizzatore, diffrazione a raggi X, analisi chimica o altri metodi”;

-colore tipico: stabilito attraverso una valutazione visiva su più campioni a secco alla luce naturale del giorno, in ombra; occorre riportare tutti gli aspetti che possono condizionare la percezione visiva, quali umidità, polvere, finitura superficiale e altre caratteristiche;

-luogo di origine: zona geografica di estrazione, deve essere il più precisa possibile, è possibile utilizzare le coordinate geografiche, con riferimento al sistema di coordinate adottato;

Se disponibili o se concordate tra acquirente e venditore, possono essere fornite anche altre informazioni come le condizioni di lavorazione (con terminologia adeguata, prevista nella UNI EN 12670), le caratteristiche naturali (che possono influenzare l’aspetto della pietra come vene, inclusioni, aggregati, xenoliti, tessitura, strutture, fratture, ecc.) e l’età geologica (secondo la EN 12670).

Prima della UNI EN 12670, la classificazione commerciale delle rocce ornamentali, seguiva le indicazioni riportate nella norma UNI 8458, nella quale i materiali erano suddivisi in quattro categorie principali: Marmi, Graniti, Pietre e Travertini in base alla loro lucidabilità e grado di durezza (Di Sivo, 2004).

L' American Society for Testing and Materials, organismo di normazione statunitense, attraverso la ASTM C119-24, suddivide i materiali lapidei a seconda della loro composizione mineralogica nelle seguenti classi: Granite Group, Limestone Group, Marble Group, Quartz-based Dimension stone Group e Slate Group.

Criteri di qualità: aspetti estetici e fisico-meccanici

La qualità delle pietre ornamentali è definita dalla combinazione di fattori estetici e fisico-meccanici.

L’aspetto estetico risulta imprescindibile nel mercato internazionale, ma deve necessariamente essere integrato da un’analisi tecnica e petrografica approfondita, che

accompagni la scelta dei materiali più duraturi nel tempo e adatti alle specifiche condizioni d'uso. Si tratta di un aspetto fondamentale, sia per il mantenimento delle capacità strutturali del materiale, sia per la conservazione stessa delle qualità estetiche.
Dal punto di vista estetico, vanno considerati i seguenti aspetti:
- il colore, che rappresenta il criterio principale; in particolare, la caratteristica più ricercata è l'omogeneità cromatica, difficile da ottenere a causa delle variazioni locali nel giacimento. Per questo motivo la produzione nello stesso sito di estrazione viene spesso suddivisa in differenti classi di qualità a seconda di questa caratteristica (Facoltà di Ingegneria, s.d.);
-il disegno, cioè la struttura e la tessitura della roccia. Questo può essere isotropo oppure orientato, con una disposizione preferenziale dei minerali che influenza l'estrazione e il taglio, producendo effetti estetici diversi. Per grandi superfici, si preferisce spesso un materiale con disegno uniforme, mentre per effetti decorativi particolari si può valorizzare un disegno orientato con tecniche di lavorazione specifiche (Facoltà di Ingegneria, s.d.);
- la grana, ovvero la dimensione dei grani, influisce sia sull'aspetto che sulla resistenza meccanica del materiale: grane fini determinano maggiore resistenza e uniformità estetica (Facoltà di Ingegneria, s.d.);
- i difetti, possono essere strutturali, ovvero legati alla fratturazione che può influenzare la forma e la qualità dei blocchi estraibili, oppure tessiturali/cromatici, dovuti ad esempio ad inclusioni. Alcuni difetti sono visibili solo dopo lavorazioni o con tecniche particolari. Inoltre, quelli che sono considerati difetti per alcuni materiali possono essere elementi decorativi per altri, a seconda della richiesta estetica (Di Sivo, 2004).
Dal punto di vista fisico-meccanico, invece, ogni materiale lapideo si distingue in funzione della sua composizione mineralogica e delle sue capacità in termini di resistenza alla compressione e flessione, resistenza agli sbalzi termici, al gelo e all'abrasione, scivolosità, assorbimento d'acqua a pressione atmosferica e per capillarità (Bargossi et al., 2008). Queste informazioni sono fondamentali per prevedere il comportamento del materiale, in termini di resistenza, durabilità e conservazione, nelle condizioni ambientali e d'uso previste, risultando così indispensabili nella fase di selezione e progettazione, affinché vengano compiute le scelte di impiego più appropriate.
La caratterizzazione meccanica riveste dunque un ruolo cruciale per stabilire l'idoneità della pietra ornamentale all'uso, tenendo in considerazione anche il suo ruolo estetico e decorativo.

Tali proprietà vengono valutate mediante procedure standardizzate da organismi di normazione internazionale: in Europa si utilizzano le normative EN, mentre in altri mercati come quello americano o orientale si seguono le ASTM (Di Sivo, 2004).

L'esecuzione delle prove di laboratorio secondo modalità standardizzate consente la ripetibilità della prova e la comparazione dei dati ottenuti per un dato materiale con quelli di materiali di diversa natura.

In Italia, le norme nazionali si adeguano progressivamente a quelle europee, garantendo uniformità e affidabilità nella valutazione.

Inoltre, affinché i prodotti possano essere commercializzati è necessaria la marcatura CE ("Conformité Européenne"). La CE è una certificazione obbligatoria che garantisce la conformità di un prodotto agli standard di sicurezza, salute e protezione ambientale stabiliti nell'Unione Europea. I prodotti, una volta testati e adempienti alle direttive, con la marcatura possono circolare liberamente all'interno del mercato europeo, in caso contrario non possono essere commercializzati.

Le stesse norme tecniche, che definiscono le caratteristiche essenziali dei prodotti lapidei, forniscono anche le indicazioni necessarie per la marcatura del prodotto, l'imballaggio e la documentazione.

Per apporre la marcatura CE è necessario seguire una procedura standardizzata (Bargossi et al., 2008):

1. eseguire prove d'identificazione iniziali e tecnologiche periodiche sul prodotto;
2. redigere una dichiarazione di conformità contenente i seguenti dati: il nome e indirizzo del fabbricante, il luogo di produzione, la descrizione del prodotto, una copia delle informazioni che accompagnano il marchio CE, numero e titolo della norma di riferimento alla quale il prodotto è conforme, nome e qualifica della persona autorizzata a firmare la dichiarazione per conto del produttore o del suo rappresentante;
3. attuare un sistema di controllo qualità su materiale grezzo, sul processo produttivo e sul prodotto finito, per garantire in continuo la conformità;
4. applicare il marchio CE su ogni imballaggio e/o sui documenti commerciali di accompagnamento, con le informazioni obbligatorie (norma di riferimento, anno, destinazione d'uso, valori dichiarati, trattamenti, ecc.).

Inoltre, le informazioni geologiche e tecniche delle cave di estrazione del prodotto costituiscono la base per la tracciabilità dei materiali, fondamentale per ottenere anche il Marchio di origine e controllo (Bargossi et al., 2008). Tale marchio richiede

l'identificazione dell'area e dello strato estrattivo (collocazione topografica e stratigrafica) e una scheda tecnica CE riportante: i riferimenti stratigrafici e la posizione esatta dello strato coltivato, la denominazione commerciale del materiale lapideo, nonché i risultati delle analisi petrografiche e modali (classificazione della roccia, minerali costituenti, principali caratteristiche strutturali come anisotropie, grado di aggregazione, cementazione dei granuli, porosità, fessurazioni e stato di alterazione) e in funzione delle specifiche destinazioni d'uso, i dati fisico-meccanici ottenuti secondo le normative previste dalla marcatura CE (Bargossi et al., 2008).

Il paragrafo seguente presenta le principali normative europee relative alle pietre ornamentali, con l'obiettivo di delineare in modo chiaro le proprietà meccaniche da considerare e caratterizzare, nonché il quadro normativo di riferimento a livello europeo.

Normative europee di riferimento

Le normative italiane ed europee forniscono i principali riferimenti per la classificazione e l'utilizzo delle pietre naturali.

Il comitato tecnico TC246 "Natural Stones" del CEN è responsabile della redazione e aggiornamento delle norme armonizzate, in conformità alla Direttiva 89/106/CEE, che stabilisce un sistema di qualificazione e marcatura obbligatorio dei prodotti da costruzione (Hugues et al., 2007).

Questa direttiva ha richiesto la produzione di norme (per dichiarare "idonei all'uso" i prodotti), linee guida (per i prodotti innovativi per cui non esistono norme armonizzate) e metodi di prova per garantire uniformità nei criteri di valutazione (Hugues et al., 2007).

Con la crescente concorrenza di Paesi come Turchia, Iran e Cina, che producono pietre simili a quelle europee, la denominazione corretta e il legame con il territorio d'origine sono diventati nel tempo elementi fondamentali di tutela (Hugues et al., 2007). Per questo il TC246 ha elaborato norme non solo tecniche, ma anche orientate alla tracciabilità e riconoscibilità commerciale delle pietre.

Le norme UNI EN 12670: 2019 ("Pietre naturali -Terminologia") e UNI EN 12440:2017 ("Pietre naturali -Criteri per la denominazione"), entrambe già introdotte nel paragrafo *La classificazione scientifica dei materiali lapidei*, rappresentano i riferimenti principali per la classificazione e denominazione delle pietre naturali in Europa.

La prima è sostanzialmente un vocabolario tecnico che definisce i termini usati per identificare e caratterizzare le pietre naturali, le cave, i metodi di estrazione e le lavorazioni (Hugues et al., 2007). Include anche la classificazione scientifica basata sulla composizione delle rocce. La seconda, frutto di un lungo lavoro normativo non ancora ultimato, stabilisce invece la denominazione commerciale delle pietre nel mercato europeo, combinando la denominazione tradizionale con la classificazione petrografica, il colore e il luogo d'origine.

Queste norme sostituiscono un sistema precedente, più semplice ma impreciso, dove le pietre venivano classificate in sole quattro categorie commerciali (marmo, granito, pietra, travertino), spesso senza coerenza scientifica (Hugues et al., 2007).

Di seguito vengono riportate le normative che stabiliscono i metodi di prova per la pietra naturale:

- UNI EN 1925, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità;
- UNI EN 1926, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della resistenza a compressione;
- UNI EN 1936, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione delle masse volumiche reale e apparente e della porosità totale e aperta;
- UNI EN 12370, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della resistenza alla cristallizzazione dei Sali;
- UNI EN 12371, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della resistenza al gelo;
- UNI EN 12372, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della resistenza a flessione sotto carico concentrato;
- UNI EN 12407, Metodi di prova per pietre naturali - Esame petrografico;
- UNI EN 13161, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della resistenza a flessione sotto momento costante;
- UNI EN 13364, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione del carico di rottura in corrispondenza dei fori di fissaggio;
- UNI EN 13373, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione delle caratteristiche geometriche degli elementi;
- UNI EN 13755, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione dell'assorbimento d'acqua a pressione atmosferica;

- UNI EN 13919, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della resistenza all'invecchiamento dovuto a SO2 in presenza di umidità;
- UNI EN 14066, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della resistenza all'invecchiamento accelerato tramite shock termico;
- UNI EN 14146, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione del modulo di elasticità dinamico (tramite misurazione della frequenza fondamentale di risonanza);
- UNI EN 14147, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della resistenza all'invecchiamento mediante nebbia salina;
- UNI EN 14157, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della resistenza all'abrasione;
- UNI EN 14158, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione dell'energia di rottura;
- UNI EN 14205, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della durezza Knoop;
- UNI EN 14231, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della resistenza allo scivolamento tramite l'apparecchiatura di prova a pendolo;
- UNI EN 14579, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della velocità di propagazione del suono;
- UNI EN 14580, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione del modulo elastico statico;
- UNI EN 14581, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione del coefficiente di dilatazione lineare termica.

Nel corso dello studio condotto per la presente tesi, finalizzata alla caratterizzazione della Pietra Bigia, sono state eseguite le seguenti prove, secondo le normative tecniche vigenti:

- UNI EN 12407:2019, Metodi di prova per pietre naturali - Esame petrografico;
- UNI EN 14579:2004, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della velocità di propagazione del suono;
- UNI EN 13755:2008, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione dell'assorbimento d'acqua a pressione atmosferica;
- UNI EN 12370:2001, Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della resistenza alla cristallizzazione dei sali;

In particolare, la determinazione della velocità di propagazione del suono è stata condotta sia in laboratorio, presso il Politecnico di Torino, sia in situ, direttamente su manufatti storici realizzati in Pietra Bigia.

1.1. Le rocce sedimentarie

Secondo la norma EN 12670:2019, le rocce sedimentarie sono "rocce formatesi per accumulo e diagenesi di sedimenti in ambienti sottomarini o subaerei".
I processi che portano alla formazione di tali rocce sono processi esogeni, cioè legati all'interazione delle rocce della crosta terrestre con atmosfera, idrosfera e biosfera e possono essere riassunti sostanzialmente in quattro fasi. Il processo di genesi inizia con la fase di disgregazione meccanica, chimica o biologica delle rocce preesistenti (ignee, metamorfiche o sedimentarie) per azione di agenti fisici (quali gelo, escursioni termiche, vento, acque dilavanti, fiumi, ghiacciai, moto ondoso) e chimici (come acqua, anidride carbonica, acidi umici, ossigeno). Segue la fase di trasporto dei materiali disgregati (i sedimenti) per mezzo dell'acqua, vento o ghiaccio in ambienti subaerei o sottomarini (come laghi, mari, pianure alluvionali). Successivamente si ha la fase di deposizione dei sedimenti che può avvenire per decantazione, precipitazione chimica o attività biologica. L'ultimo processo è la diagenesi o litificazione, attraverso la quale, prima per compattazione (riduzione dei vuoti tra le particelle grazie alla pressione esercitata dagli strati sovrastanti depositatesi nel tempo) e poi tramite cementazione (per precipitazioni di sostanze cementanti, calcaree, dolomitiche, silicee, argillose, ferrose), i sedimenti sciolti si trasformano in rocce coerenti.
In questo processo, le ghiaie si trasformano in conglomerati, i frammenti angolosi in brecce, le sabbie in arenarie, le argille in rocce argillose e il carbonato di calcio in calcari (Hugues et al., 2007).
Le diverse denominazioni appena attribuite dipendono dalla classe granulometrica di appartenenza dei sedimenti originari.
La durata e l'intensità dei processi diagenetici influenzano il grado di compattezza, che a sua volta determina caratteristiche come la durezza e la coesione delle rocce sedimentarie; le rocce più antiche risultano generalmente più compatte.
Una caratteristica distintiva delle rocce sedimentarie, anche se non sempre visibile ad occhio nudo, è la stratificazione orizzontale, dovuta alla deposizione progressiva di

materiali diversi (Hugues et al., 2007).

In base alla composizione e alla struttura delle rocce sedimentarie, che a loro volta dipendono dall'ambiente e dai processi meccanici, chimici, biologici o residuali di formazione, si distinguono nelle seguenti quattro categorie principali (Facoltà di Ingegneria, s.d.).

1) *Rocce sedimentarie detritiche o clastiche*: si formano per disgregazione meccanica di rocce preesistenti e successivo trasporto, deposito, compattazione e cementazione dei sedimenti (clasti); rappresentano circa il 75% delle rocce sedimentarie (Facoltà di Ingegneria, s.d.). A loro volta, in base alla granulometria dei clasti, vengono suddivise in:

- rocce psefitiche (ruditi o conglomerati): sono le meno diffuse e sono caratterizzate da clasti di dimensioni superiori a 2 mm. Si distinguono ulteriormente in: brecce, se formate da clasti a spigoli vivi, generalmente indicativi di un trasporto limitato, e in puddinghe, se formate da clasti arrotondati, la cui forma suggerisce un prolungato trasporto in acqua;
- rocce psammitiche (areniti o arenarie): clasti di dimensioni comprese tra 2 mm ed 1/16 mm; contenuto mineralogico tipico: quarzo, feldspati, calcite e in misura subordinata biotite, muscovite ed altri; vengono classificate a loro volta in base alla composizione mineralogica;
- rocce pelitiche (o lutiti)*:* sono le più abbondanti e le dimensioni dei clasti sono inferiori a 1/16mm. Prevalentemente costituite da minerali argillosi e in minore quantità da quarzo, calcite, miche, idrossidi; classificate a loro volta in base alla composizione mineralogica.

2) Rocce sedimentarie chimiche: si formano per precipitazione chimica di minerali in soluzione o in sospensione colloidale derivanti dall'azione erosiva dell'acqua su rocce affioranti; la precipitazione può avvenire per saturazione o a causa di variazioni fisico-chimiche dell'ambiente (es. evaporazione o variazione di temperatura/pH). A loro volta, in base al contenuto mineralogico, si distinguono in:

- evaporiti o rocce saline*:* derivano dall'evaporazione in bacini chiusi (es. mari interni, laghi salati), ovvero ambienti evaporitici dove l'evaporazione non è compensata da sufficienti apporti di acque dolci; sono composte principalmente da cloruri e solfati di sodio, calcio, magnesio, potassio;
- rocce carbonatiche chimiche: derivano dalla precipitazione del carbonato di calcio ($CaCO_3$) da soluzioni ricche di bicarbonati, in funzione della Co2, del grado di evaporazione e altri fattori; sono prevalentemente costituite da calcite e in misura subordinata da dolomite;

- rocce ferrifere e manganesifere*:* formate da ossidi e idrossidi di ferro e manganese. Si depositano in ambienti palustri o marini sotto forma di noduli e concrezioni, spesso con intervento biologico da parte di microorganismi (alghe, batteri).

3) Rocce sedimentarie organogene (o biochimiche): derivano dall'attività di organismi viventi, attraverso processi di biocostruzione o accumulo di resti biologici. Sono suddivise a loro volta in:

-rocce carbonatiche e silicee organogene*:* hanno origine inorganica e sono formate da organismi biocostruttori, all'interno delle quali essi stessi andranno a vivere, o per accumulo passivo di scheletri o gusci di organismi come coralli, molluschi, echinodermi, foraminiferi, radiolari, alghe; la composizione è prevalentemente carbonatica (calcite, aragonite, dolomite; in misura minore silice);

-rocce organiche*:* costituite da residui vegetali o animali accumulati (sia parti organiche che prodotti di attività biologica); sono importanti come georisorse ma non impiegate come rocce ornamentali.

4) Rocce sedimentarie residuali: si formano per alterazione chimica prolungata di rocce affioranti in ambienti caldi e umidi, dove l'acqua e l'anidride carbonica dissolvono i minerali solubili, lasciando un residuo ricco in minerali argillosi, ossidi e idrossidi di ferro e alluminio. In base al contenuto mineralogico, di distinguono a loro volta in:

-argille residuali: composte principalmente da minerali argillosi; derivano dall'alterazione di rocce feldspatiche (es. graniti);

-lateriti e bauxiti: ricche di ossidi ed idrossidi di alluminio e ferro per dissoluzione di silice, tramite azione solvente dell'acqua operate sulle rocce ignee e in maniera minore dalle calcaree. Le bauxiti sono la principale fonte di alluminio per l'industria, presente in maggiore quantità rispetto alle lateriti.

Le informazioni appena riportate sulle quattro categorie di rocce sedimentarie e le rispettive sottoclassi, sono state estrapolate dal *Catalogo del Museo di Arte e Giacimenti Minerari: Sezioni rocce ornamentali e rocce mineralizzate*, fornito dalla Facoltà di Ingegneria dell'Università degli studi di Roma "La Sapienza"; nel testo è già stato citato nella forma breve (Facoltà di Ingegneria, s.d.), non avendo altre informazioni sugli autori.

La notevole varietà di composizione, struttura e proprietà delle rocce sedimentarie, riflette la complessità dei processi che ne determinano la formazione. Questa molteplicità, si riflette anche nella loro destinazione d'uso. Alcune rocce clastiche (come le arenarie compatte), carbonatiche e silicee trovano impiego come materiali lapidei decorativi, in virtù delle loro caratteristiche estetiche, di lavorabilità e di resistenza; altre sedimentarie,

in particolare quelle di origine chimica, organogena o residuale vengono largamente sfruttate come risorse minerarie (es. per la produzione di calce, cemento, ceramiche) o come fonti energetiche, come nel caso dei depositi di carbone e degli scisti bituminosi (Facoltà di Ingegneria, s.d.).

Nella Tabella 1 è riportata schematicamente la classificazione dei gruppi petrografici delle rocce sedimentarie prevista nella normativa EN 12670:2019.

Tabella 1- classificazione dei gruppi petrografici delle rocce sedimentarie (EN 12670:2019)

Rocce sedimentarie	**Famiglia delle rocce silicee**	Rocce silicee
	Famiglia delle arenarie	Arenaria quarzosa (quartz arenite)
		Greywacke quarzosa (quartz greywacke)
		Subarcosa (subarkose)
		Arenaria sublitica (sublithic arenite)
		Arenaria subfeldspatica (subfeldspathic arenite)
	Famiglia delle arcose	Arcosa (arkose)
		Arcosa litarenitica (arkose litharenite)
		Arenaria feldspatica (feldspathic arenite)
		Arcosa litica (lithic arkose)
	Famiglia delle greywacke	Arenaria litica (lithic arenite)
		Greywacke
		Greywacke feldspatica (feldspathic greywacke)
		Greywacke arcosica (arkosic greywacke)
		Greywacke litica (lithic greywacke)
	Famiglia delle argille	Argillite, scisti argillosi (claystone, shale)
	Famiglia dei marni	Marna (marl)
	Famiglia dei calcari	Calcari (limestones)
		Calcari dolomitici (dolomitic limestones)
		Calcari micritici (mikritic limestones)
		Calcari sparitici (sparitic limestones)
		Calcari oolitici (oolithic limestones)
	Famiglia delle dolomie	Dolomie (dolomites)
		Dolomie calcitiche (calcitic dolomites)
		Dolostoni (dolostones)
	Famiglia delle evaporiti	Gesso (gypsum)
		Sale (salt)

1.2. Le arenarie

Le arenarie, o rocce psammitiche o areniti, appartengono al gruppo più abbondante di rocce sedimentarie, ovvero le detritico-clastiche.

Nella EN 12670:2019 vengono definite come "roccia sedimentaria detritica terrigena composta da grani di quarzo, feldspato, mica e frammenti litici provenienti da rocce più antiche, con dimensioni comprese tra 1/16 mm e 2 mm".

I principali componenti sono il quarzo (minerali prevalente, molto resistente) e i feldspati (potassico e plagioclasio, meno resistenti chimicamente), sono presenti anche silicati, muscovite e glauconite (verde) (Hugues et al., 2007).

A seconda delle percentuali relative delle fasi mineralogiche costituenti vengono classificate secondo Folk come rappresentato in Figura 1 (EN 12670:2019).

Nella EN 12670:2019, l'arkose viene definita come "roccia sedimentaria detritica con meno del 75% in volume di quarzo e un alto contenuto di grani di feldspato".

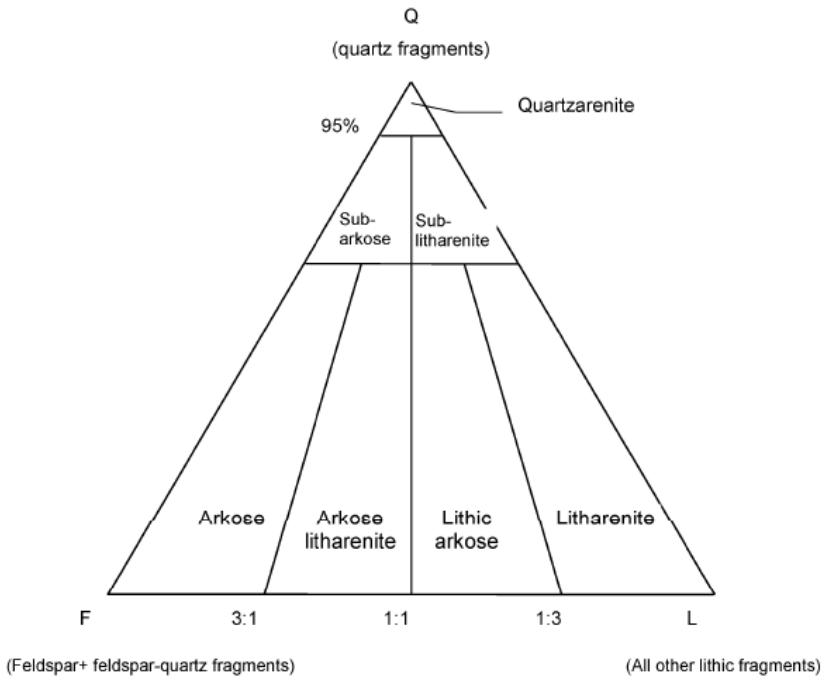


Figura 1- Diagramma QAPF per la classificazione delle arenarie secondo Folk (EN 12670:2019)

Le arenarie sono dunque, sabbie litificate i cui clasti sono legati assieme tramite un cemento che può essere: siliceo (quarzo, calcedonio), calcareo, dolomitico, argilloso, argilloso-calcareo, ferruginoso, gessoso, ma più frequentemente misto (Blanco, 2008). La natura del cemento e le modalità in cui è avvenuto il processo di diagenesi, determinano le caratteristiche fisiche di tali rocce, in particolare il grado di compattazione, in base al

quale si distinguono in forti o friabili (Blanco, 2008); inoltre, le proprietà sono influenzate oltre che dal tipo di cemento anche dalla porosità, dalla permeabilità e dalla composizione mineralogica della roccia (Hugues et al., 2007).

Le arenarie hanno generalmente una consistenza solida e uniforme, abrasiva ma non levigabile, sono facilmente lavorabili, a seconda della loro compattezza, e possono essere impiegate come pietre da taglio, per elementi architettonici, rivestimenti, e pavimentazioni (Hugues et al., 2007) (Blanco, 2008).

Nella tabella sono riportati i valori di alcune grandezze caratteristiche delle arenarie, secondo Blanco (2008):

Tabella 2- Valori ripresi dalla Tabella "Analisi fisico-meccaniche" dal libro di Blanco (2008), "Manuale di progettazione. Marmi e pietre"

densità	2500-2700	kg/m^3
peso specifico	2.5-2.7	
coefficiente di imbibizione (in peso)	3.03	$\%_0$
coefficiente relativo di abrasione (usura per attrito)	0.55	
carico di rottura a:		
compressione semplice	600-1000	kg/cm^2
c. semplice dopo trattamento di gelività	706.8	kg/cm^2
trazione indiretta mediante flessione	45.56	kg/cm^2

I colori con cui si presentano sono molto variabili: grigio, bruno-giallastro, rossastro, verdognolo (Blanco, 2008), sono meno vivaci rispetto ad altre rocce e le tonalità sono influenzate da ossidi di ferro o glauconite.

Alcune arenarie, caratterizzate dalla tipica giacitura a strati, si formano per deposizione torbiditica che avviene solitamente in prossimità dei margini continentali attivi (es. Alpi, Ande) (Bargossi et al., 2008). Le correnti di torbida sono sostanzialmente colate o frane sottomarine detritiche in grado di spostare e trasportare grandi quantità di materiale dalla zona costiera a grandi profondità marine (Fratini et al., 2014) e si attivano generalmente per instabilità dei materiali o a causa di fenomeni come terremoti o tempeste, producendo nuovi apporti di sedimento (Bargossi et al., 2008).

La deposizione del materiale trasportato da una corrente di torbida dipende dalla granulometria e dall'energia della corrente e dà origine a un primo strato sedimentario. I

successivi strati si accumulano nel tempo sopra i precedenti e l'insieme del loro spessore può rappresentare un determinato arco temporale.

Con il passare del tempo, nuove correnti torbiditiche continuano a depositare sedimenti, formando sequenze stratificate che possono raggiungere anche migliaia di metri di spessore. Una volta accumulati, questi sedimenti possono subire processi di litificazione, sollevamento o sprofondamento legati alla dinamica terrestre, oppure riemergere ed essere coinvolti in nuovi cicli di erosione e trasformazione (Bargossi et al., 2008).

La sequenza di Bouma (1962) descrive la stratificazione tipica dei depositi torbiditici, dal basso verso l'alto, a granulometria decrescente (Bargossi et al., 2008):

a – sabbia grossolana/massiccia o gradata (arenite);

b – sabbia fine/media a laminazione parallela;

c – sabbia finissima a laminazione incrociata;

d – silt (limo) a laminazione parallela;

e – pelite (argilla) omogenea.

Una successione di strati che presenta caratteristiche comuni (come composizione, colore, struttura o contenuto fossilifero) viene riconosciuta come un'unità stratigrafica, ossia una sezione distinguibile all'interno della successione geologica (Bargossi et al., 2008).

Quando anche le caratteristiche litologiche, ovvero il tipo di roccia (ad esempio sabbiosa, calcarea, argillosa), risultano uniformi all'interno della sequenza, essa viene definita unità litostratigrafica (Bargossi et al., 2008).

La Formazione rappresenta l'unità litostratigrafica di base: è un termine tecnico che indica un corpo roccioso con caratteristiche sufficientemente omogenee da poter essere cartografato e distinto da unità adiacenti (Bargossi et al., 2008).

Le areniti, come tutti i materiali lapidei, una volta poste in opera, sono soggette a diverse tipologie di azione degradante: tipo meccanico, con sollecitazione da carico, flessione, urto ed attrito; di tipo fisico, con dilatazioni e fratturazioni imputabili a sbalzi termici per insolazione, per gelo e disgelo e per cristallizzazione dei Sali; di tipo chimico come i fenomeni d'ossidazione, idratazione, aggressione acida e quelle degli agenti biodeteriogeni. L'insieme di queste azioni, nel tempo, può produrre modificazioni delle caratteristiche estetiche e anche un deterioramento del materiale dal punto di vista tecnico.

Di seguito un elenco di varietà italiane di arenaria, estrapolato dal libro di Giorgio Blanco "*Manuale di progettazione. Marmi e pietre"* (2008):

- Arenaria Azzurra di Sarnico (Lago d'Iseo, Bergamo): compatta, grigio-azzurrastra, resistenza 900 kg/cm². Utilizzata per interni; non più in produzione;

- Pietra Simona (Valcamonica, Brescia): rossastra scura, grana fine- finissima;
- Pietraforte (Firenze) e Pietra Serena (Firenze, Perugia e provincia): tradizionalmente impiegate nell'edilizia storica;
- Macigno (Pescia (Pistoia), Perugia, Todi): arenaria argilloso-calcareo, usata per costruzione;
- Arenaria di Gorgoglione e Cirigliano (Matera): compatta, feldspatica, di colore grigio o rossiccio, impiegata per pavimentazioni e monumenti;
- Arenaria di Umbertide (Perugia): quarzoso-micacea, con biotite e plagioclasio, usata estensivamente per edifici locali;
- Arenaria di Dego (Savona): varietà di Pietra Serena, oggi non più estratta;
- Arenaria di Visone: corrisponde alla cosiddetta Pietra di Visone;

Diversi altri tipi di arenarie sono escavati nelle zone di Lucca, Pistoia, Grosseto, Perugia ecc.

1.3. Le arenarie toscane

La Toscana ha avuto da sempre un ruolo rilevante a livello storico e internazionale nel settore lapideo, grazie alla ricchezza e varietà dei suoi giacimenti: dai marmi apuani, impiegati già in epoca romana e ricordati da storici come Strabone, Plinio e Vitruvio, al pregiato marmo giallo di Siena, ai marmi Noisette di Livorno, ai travertini di Siena e Grosseto, apprezzati fin dai tempi degli Etruschi, al granito grigio dell'Isola d'Elba fino alle arenarie, omogenee nel colore e compatte, che hanno contribuito a rendere in particolare Firenze unica e riconoscibile dal punto di vista architettonico-monumentale (Regione Toscana et al., n.d.).

Autori come Giorgio Vasari, Agostino del Riccio, Filippo Baldinucci, Giovanni Targioni Tozzetti hanno scritto sulle pietre e sui marmi presenti a Firenze, elogiandone le qualità in termini di resistenza e di lavorabilità ed indicandone le zone di estrazione antiche nel territorio fiorentino o all'interno della Repubblica fiorentina; più recentemente Francesco Rodolico nel suo libro, *Le pietre delle città d'Italia*, ne dedica un intero capitolo (Sartori, 2002).

I sei litotipi di cui viene scritto principalmente sono: la Pietraforte, la Pietra Serena e la Pietra Bigia, varietà della Serena da cui si differenzia per il colore ed altre proprietà, impiegate solitamente per la realizzazione di palazzi, ponti e mura, i "Marmi bianchi", il

"Verde di Prato" ed i "Marmi Rossi", riconoscibili nelle facciate delle chiese (Sartori, 2002).

Agostino del Riccio, nel suo manoscritto *Istoria delle pietre* scriveva: *"*È tanta copia di pietre varie appresso alla città, come ho dimostro in questo nostro libro delle pietre, che non è maraviglia che tempii e chiese, torri e palazzi, casamenti, logge fanno stupir tutti i forestieri" (Sartori, 2002).

Nell'Appennino settentrionale, sono molteplici gli affioramenti delle successioni torbiditiche silicoclastiche dell'Oligocene-Miocene, come il Macigno, le Arenarie di Cervarola-Falterona e la Marnoso Arenacea. Si riporta in Figura 2 un'immagine rappresentativa della distribuzione superficiale delle principali unità torbiditiche dell'Oligocene-Miocene del Dominio Toscano e Umbro-Marchigiano.

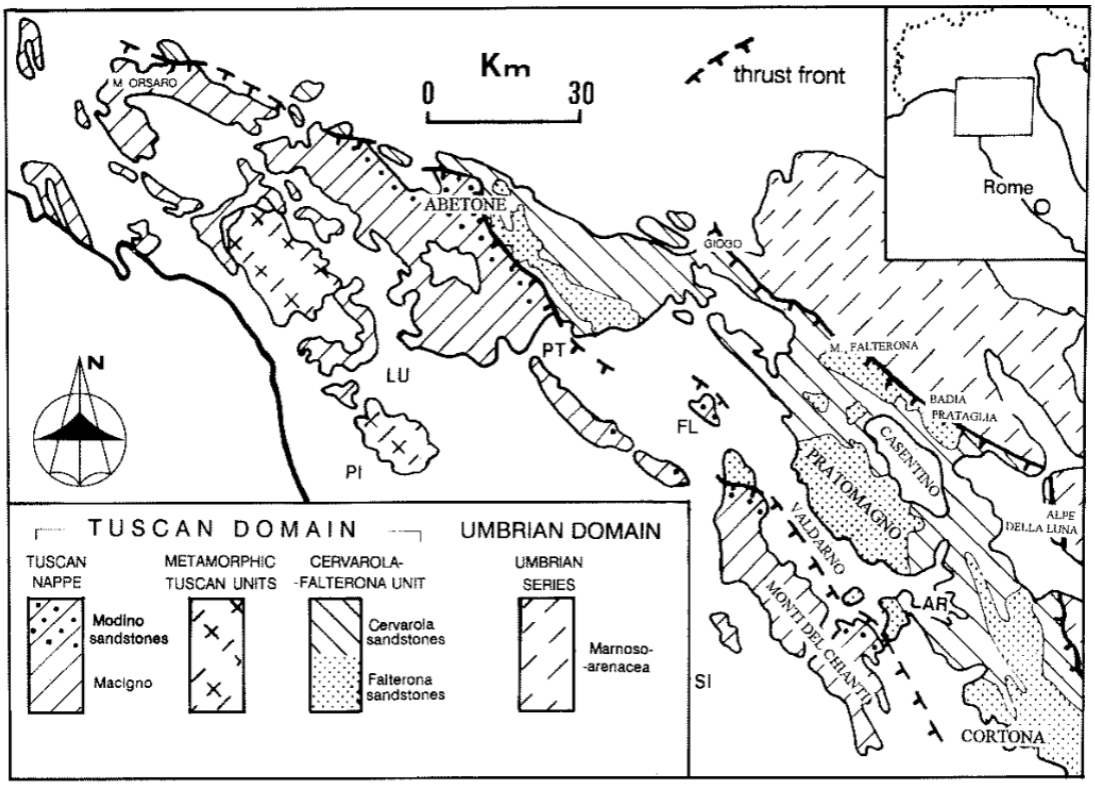


Figura 2- Distribuzione superficiale delle unità torbiditiche dell'Oligocene-Miocene del Dominio Toscano e Umbro-Marchigiano nell'Appennino settentrionale (Bruni et al., 1994).

La complessità dei fenomeni che coinvolgono tali successioni nelle pieghe e nei sovrascorrimenti della catena appenninica oltre ad altri fattori, rendono molto difficile le loro ricostruzioni stratigrafiche e tettoniche e sono tutt'oggi motivo di dibattito e incertezza.

Esistono diverse teorie sulla formazione del Macigno che nel caso dell'area dell'Abetone, di età compresa tra l'Oligocene superiore e il Miocene inferiore, è situata al di sopra della Scaglia toscana pelagica (prevalentemente argillosa, di età Cretaceo-Oligocene inferiore) e che insieme alle sovrastanti Marne di Pievepelago costituisce l'unità stratigrafica superiore della Falda Toscana.

Secondo alcuni studiosi è una successione torbiditica spessa (fino a 3000m) e continua; in questo caso l'intercalazione caotica argilloso-marnosa-carboniosa di spessore 250m circa, conosciuta come "Olistostroma di Monte Modino" viene interpretata come una frana sinsedimentaria che ha interrotto brevemente la sedimentazione torbiditica (Bruni et al., 2007). Secondo altri, invece, l'Olistostroma di Monte Modino è la base stratigrafica della sovrastante unità tettonica distinta di Monte Modino (Bruni et al., 1994). Le difficoltà riscontrate nel trovare risposte a tale problema sono attribuite allo "spessore notevole, alle litologie monotone, all'ampia gamma di spessori di strato e ai deboli segnali biostratigrafici della sedimentazione torbiditica sovrastante e sottostante l'Olistostroma di Monte Modino" (Bruni et al., 1994).

I principali affioramenti del Macigno si ritrovano nell'area dell'Abetone, dei Monti del Chianti, della Gonfolina e di Fiesole come è possibile osservare dalla carta in Figura 2 e di cui si riportano le colonne stratigrafiche approssimate in Figura 3.

La successione dell'Abetone si sviluppa dal contatto basale con gli Scisti Policromi fino al contatto sommitale con le Arenarie di Monte Modino e le Marne di Pievepelago, per uno spessore di circa 3000m; a circa 1600 m dalla base stratigrafica, si trova l'Olistostroma di Monte Modino (Pandeli et al., 1994). Altrettanto spessa e con gli stessi limiti stratigrafici è la successione torbiditica complessa dei Monti del Chianti, nella quale, a circa 1100 e 2000m sopra la base stratigrafica, si trovano due olistostromi spessi fino a 300m, quello inferiore non ha controparte nell'area dell'Abetone (Pandeli et al., 1994).

La successione torbiditica della Gonfolina con spessore di circa 600m, è principalmente caratterizzata dalla petrofacies del Macigno Superiore ed è tettonicamente sovrapposta dalle Unità Liguri, così come per la successione torbiditica di Fiesole, che si sviluppa per uno spessore di circa 400m secondo la facies di Monte Modino (Pandeli et al., 1994).

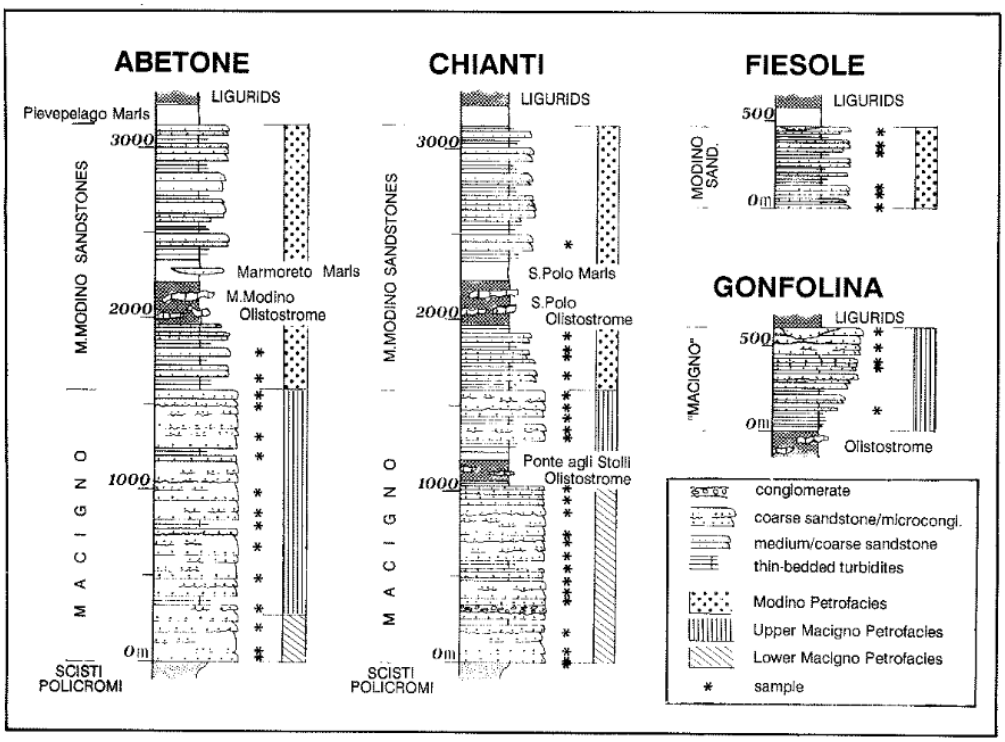


Figura 3- Colonne stratigrafiche semplificate che mostrano l'evoluzione delle litofacies arenacee e i cambiamenti delle petrofacies litiche per le aree con i principali affioramenti del Macigno (Pandeli et al., 1994).

Ed è in questo contesto geologico, vario e complesso, solo brevemente e parzialmente introdotto, che, in particolare nei dintorni di Firenze, situata sul substrato formato dalle Unità Liguri che si sovrappongono tettonicamente alle formazioni dell'Unità Toscana, sono nate in passato le diverse cave di estrazione.
Tali affioramenti hanno “nutrito” la città per secoli, garantendo apporti continui di materiali lapidei sedimentari come le due arenarie, protagoniste della città: la Pietraforte e la Pietra Serena.

Pietraforte

La Pietraforte è una formazione torbiditica del Cretaceo superiore, un complesso alloctono che appartiene alle Liguri Esterne e si estende sopra la Serie Toscana. Tra Firenze e Civitavecchia affiora in tre zone principali e vicino Firenze e ai Monti del Chianti questa formazione è inclusa nella Formazione di Sillano come “lenti” di spessore compreso tra meno di 100 m (es. Riscaggio) fino a 800 m (Banchelli et al., 1997).

Dal punto di vista litologico: "costituita da sottili strati di arenarie carbonatiche (spessore medio 20-30 cm, max 1 m) intercalati da siltiti e argilliti" (Banchelli et al., 1997).

Dal punto di vista petrografico: arenarie classificabili come areniti litiche con cemento carbonatico (Banchelli et al., 1997).

La Pietraforte, caratterizzata da vene di calcite e da un cemento prevalentemente carbonatico che le conferisce un'elevata compattezza, è stata il principale materiale da costruzione per gli innumerevoli palazzi, ponti e mura della città di Firenze.

Le cave più antiche della pietra, prima che venissero chiuse a causa dell'espansione della città ed aperte più a sud nella zona di Monteripaldi, erano situate in piazza S. Felicita, Costa San Giorgio e Boboli, proprio all'interno del centro storico attuale di Firenze, nella zona di "Oltrarno" (Banchelli et al., 1997). Attualmente, l'estrazione di Pietraforte prosegue a est di Firenze, nella località di Riscaggio e nei pressi di Greve indicate nella carta in Figura 4 (Banchelli et al., 1997).

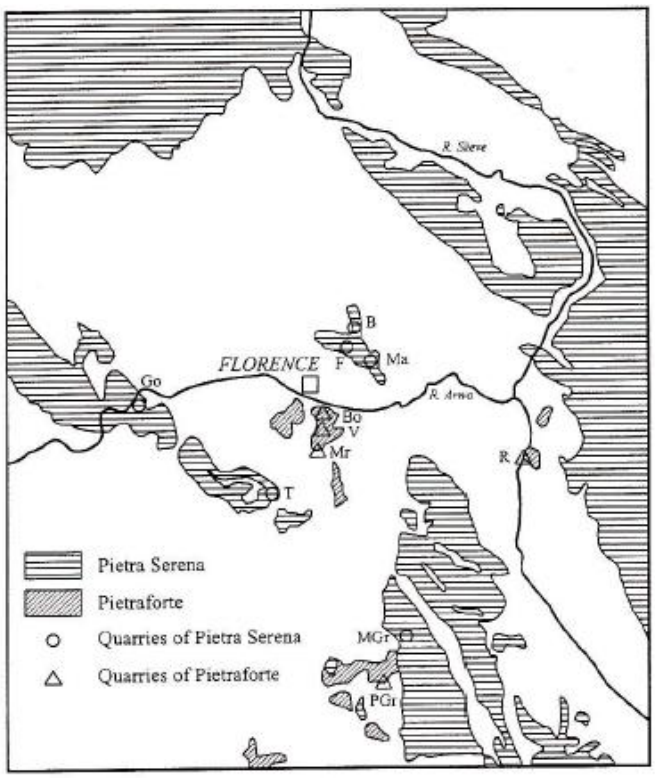


Fig. 1 – Outcrops of sandstone formations in Florence district and location of the sampled quarries.
Pietra Serena: F = Faentina; B = Bolognese; Ma = Maiano; Go = Gonfolina; T = Tavarnuzze; - Gr = Greve.
Pietraforte: V = Viale Galileo; Bo = Boboli; R = Riscaggio; Gr = Greve; Mo = Monteripaldi.

Figura 4- Affioramenti di formazioni arenarie nel distretto di Firenze e ubicazione di alcune cave (Banchelli et al., 1997)

Pietra Serena

La Pietra Serena, nome dato dagli scalpellini e dagli architetti del passato, è un'arenaria della formazione torbiditica del Macigno-Monte Modino, dell'Oligocene superiore/Miocene inferiore, sovrastante la Falda Toscana e affiorante nell'Appennino settentrionale, come precedentemente descritto. La successione è costituita da sequenze alternate arenacee e arenaceo-pelitiche (Banchelli et al., 1997).

Dal punto di vista petrografico è un'arenaria classificata come arkose litica contenente quarzo, feldspato, clasti litici, muscovite, biotite, clorite, con quantità variabili di matrice argillosa e cemento calcitico come quanto riportato dal sito ufficiale della IUGS (International Commission on Geoheritage). Nel 2019 la Pietra Serena è stata ratificata come Heritage Stone, secondo la classificazione IUGS, dall'Heritage Stones Subcommission (HSS) dell'International Commission on Geoheritage (ICG).

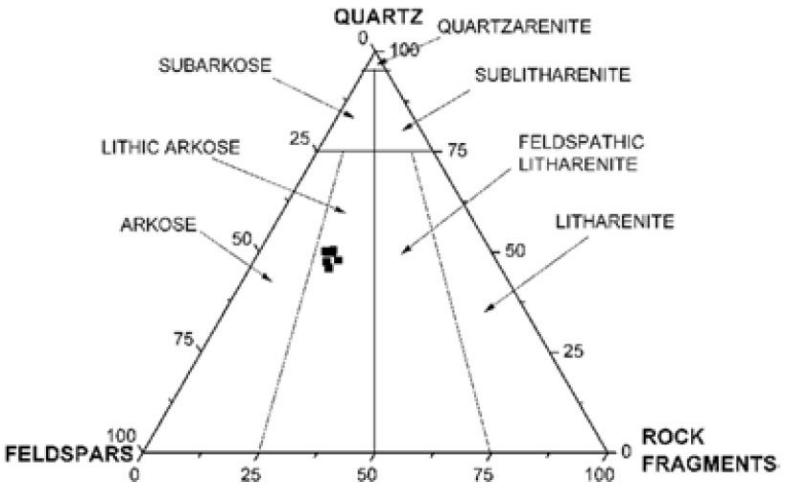


Figura 5- Diagramma di classificazione per rocce sedimentarie (modificato secondo Folk, 1974). I quadrati neri rappresentano i risultati di campioni in Pietra Sereno dello studio condotto nell'articolo di Banchelli et al. (1997)

I clasti sabbiosi che la costituiscono derivano in parte da rocce metamorfiche di medio e basso grado e in parte da rocce silicoclastiche: sono presenti "granuli di quarzo, frammenti metamorfici e granitici, feldspati e fillosilicati" (Cipriani et al., 2005). Tali sedimenti sono tenuti assieme da una matrice argillosa ricristallizzata ed in quantitativi minimi da un cemento carbonatico (Cipriani et al., 2005).

La granulometria è variabile (da 200-400 μm) (Sartori, 2002), a seconda delle cave da medio-fine a grossolana (particolarmente fine è quella della Pietra del Fossato).

La tessitura è generalmente omogenea e uniforme, caratterizzata spesso da laminazioni, gradazioni (variazioni della granulometria entro lo spessore di un singolo elemento); rara la presenza di vene di calcite spatica che possono rappresentare zone di debolezza sia strutturale che estetico andando ad inficiare l'omogeneità della pietra; i puntini lucenti sono dovuti alla presenza di scagliette di mica (Sartori, 2002).

In cava, al taglio fresco, mostra un colore grigio-azzurrognolo che può diventare avana quando la pietra è esposta all'esterno (Sartori, 2002). Tale alterazione cromatica viene attribuita alla decomposizione della clorite che può trasformarsi in clorite-vermiculite variando lo stato di ossidazione del ferro e determinando non solo la trasformazione cromatica ma anche un peggioramento delle caratteristiche in termini di resistenza e durabilità del materiale.

All'interno della stessa successione torbiditica al tetto della Falda Toscana, vengono distinte due varietà di arenarie: quella dell'Arenaria di Monte Modino, di grana medio-fine, che affiora a Fiesole, Settignano, Vincigliata, Valle del Mugnone, in generale nelle località a nord di Firenze e quella dell'Arenaria Macigno, di grana medio-grossa, che affiora invece a sud-ovest di Firenze nelle località Gonfolina, Carmignano (Comune di Lastra a Signa) ed a Montebuoni-Tavarnuzze (Comune di Impruneta), anche nel monte Orsaro all'Abetone, sui monti Albani e nel Chianti fino al monte Cetona (Sartori, 2002).

La Pietra Serena, generalmente, va incontro a fenomeni di degradazione importante se esposta all'esterno, la sua resistenza si riduce a tal punto da essere necessaria una sua sostituzione dopo alcune decine di anni; fanno eccezione il colonnato degli Uffizi, la Loggia del Mercato Nuovo e il porticato di piazza Santissima Annunziata dove la Pietra Serena si presenta ancora in buone condizioni di conservazione (varietà Pietra del Fossato) (Bargossi, Felli, & Gurrieri, 2008). Le principali forme di degrado a cui va incontro sono: formazione e cadute di croste parallele alle superfici a vista indipendentemente dalla orientazione dei piani di stratificazione (esfoliazione), polverizzazioni e disgregazioni superficiali di tipo fisico, fessurazioni parallele secondo i piani di stratificazione e distacco di parti per dissoluzione di vene di calcite (Sartori, 2002). Anche l'alterazione cromatica, suddetta, che porta la pietra ad assumere una colorazione avana e dovuta alla decomposizione delle cloriti presenti nella pietra, porta alla riduzione delle sue caratteristiche di resistenza e al suo disfacimento.

La Pietra Serena è dunque fortemente legata alla storia fiorentina, al punto da costituire un vero e proprio "marchio" dell'architettura locale. È stata impiegata dall'epoca etrusca fino al XIX secolo.

Dalle mura di Fiesole realizzate con i blocchi ciclopici, proseguendo con i Romani e i Longobardi, per le tombe e le strutture religiose, dal XIII secolo in poi, con l'espansione del libero Comune di Firenze e la presenza di cave nelle immediate vicinanze (tra cui la valle del Mugnone, Settignano e Monte Ceceri, Fiesole), la Pietra Serena venne largamente adottata sia per la vicinanza alle cave che per la facile lavorabilità che la contraddistingue (Fratini et al., 2014). L'apice del suo utilizzo fu raggiunto nel Rinascimento, in particolare con Brunelleschi e successivamente con Michelangelo. Brunelleschi ne fece un elemento distintivo, accostandone il grigio intenso all'intonaco bianco nei suoi progetti per San Lorenzo e Santo Spirito, mentre Michelangelo utilizzò per la Biblioteca Laurenziana la varietà a grana fine detta "Pietra del Fossato" di cui Giorgio Vasari scrive nel *Le Vite* (Fratini et al., 2014) (Sartori, 2002). La Pietra del Fossato è una particolare varietà escavata sul torrente Mensola sotto Settignano, tra il Monte Ceceri e Vincigliata, dalla Cava delle Colonne che, circa un secolo fa, fu trasformata in un laghetto facendovi fluire l'acqua del Mensola (Fratini et al., 2014); tale varietà risulta, grazie alla grana finissima e all'elevato contenuto in calcite, un materiale di particolare pregio e resistenza, come è possibile denotare dall'ottimo stato di conservazione del colonnato degli Uffizi e della Loggia del Mercato Nuovo, come già anticipato.

Sempre in epoca rinascimentale, furono aperte le cave di Trassinaia e Gonfolina per realizzare con grandi blocchi unici, le colonne monolitiche della Loggia degli Innocenti e quelle di San Lorenzo (Fratini et al., 2014).

Nel XVI secolo, furono istituite le "Cave Proibite" per pietre di particolare pregio estetico e meccanico, la cui estrazione necessitava un'autorizzazione. Queste cave erano situate tra San Francesco e Fontelucente, la collina a ovest di Fiesole, e Mulinaccio, vicino a Maiano, a est di Fiesole secondo quanto scritto da Targioni Tozzetti (Fratini et al., 2014). Nello stesso periodo venne introdotto in parallelo l'utilizzo della varietà della Pietra Serena denominata Pietra Bigia, diversa per il colore, marrone chiaro, e ritenuta più resistente agli agenti atmosferici e per questo preferita nelle facciate (Fratini et al., 2014). L'impiego della Pietra Serena proseguì anche nell'Ottocento con l'architetto Giuseppe Poggi (Sartori, 2002) e nuove cave vennero aperte più a sud della città, in particolare nelle zone di Montebuoni, Tavarnuzze e Greve in Chianti (cava Caprolo) (Fratini et al., 2014). Da anni ormai, tutte le cave di Pietra Serena, comprese quelle storiche di Fiesole come Monte Rinaldi e Monte Ceceri, sono state chiuse a causa dell'esaurimento del materiale o di vincoli paesaggistici imposti da ordinanze urbanistiche, aggravati dalla loro prossimità al centro urbano di Firenze. Attualmente, l'estrazione continua solo in due siti:

Caprolo, nei pressi di Greve in Chianti, e Porto di Mezzo – La Lisca, nel comune di Lastra a Signa, sebbene in quantità molto limitate (Sartori, 2002).

La necessità di un litotipo alternativo, con aspetto e proprietà affini alla Pietra Serena, da utilizzare nei restauri e nelle integrazioni delle architetture fiorentine, ha favorito l'impiego e la diffusione di materiali provenienti da formazioni geologiche diverse, anche esterne alla Toscana, talvolta commercializzati sotto la denominazione di Pietra Serena.

In alternativa alla Pietra Serena, si ricorre tutt'oggi a pietre macroscopicamente molto simili ma appartenenti a formazioni geologiche diverse, come ad esempio la Pietra Serena di Firenzuola, appartenente alla Formazione Marnoso-Arenacea ed estratta nel comune di Firenzuola (Appennino, a nord-est di Firenze), la Pietra di Santa Brigida, di recente riapertura, situata a est di Firenze e appartenente alla Formazione di Monte Senario e la Pietra Macigno.

La Pietra Serena di Firenzuola, come già anticipato appartiene alla serie marnoso-arenacea romagnola di età miocenica, che costituisce la dorsale dell'Appennino settentrionale. All'interno delle cave vengono coltivati diversi strati produttivi (Sasso Grosso, Filaretti e Colombino), e principalmente le areniti dei "Filaretti" (areniti quarzo-feldspatiche e litoareniti feldspatiche) (Regione Toscana et al., n.d.).

Di seguito in Tabella 3, l'elenco riassuntivo delle informazioni tecniche più rilevanti, estrapolate dal libro *The Tuscan stone identities*. [S.l.], Regione Toscana.

Tabella 3- Tabella riassuntiva delle proprietà della Pietra Serena di Firenzuola (Regione Toscana et al., n.d.)

Nome tradizionale:	Pietra Serena di Firenzuola		
Luogo d'origine:	Firenzuola (Firenze)		
Nome petrografico (secondo EN 12407):	litarenite		
Colore:	grigio-azzurrogno		
Descrizione macroscopica:	"litotipo sedimentario di colore grigio, a grana media, dall'aspetto omogeneo macchiettato da individui di colore nero e madreperlaceo. La roccia è compatta, ma mostra una spiccata porosità superficiale."		
Descrizione microscopica (secondo EN 12407 e EN 12670):	"arenaria eterogenea a grana medio-fine (0,1÷0,7 mm). Dal punto di vista dimensionale è moderatamente selezionata e ha tessitura anisotropa per l'isorientazione dei granuli di forma allungata. La frazione clastica è costituita da litoclasti (60%) olocristallini (magmatici, scisti, marmi) e sedimentari (micritici) e frammenti selciosi: quarzo (35%) monocristallino limpido, localmente con inclusi bollosi e di microcristalli, talora deformato, anche policristallino; i feldspati (5%) sono presenti in pochi individui sia come k-feldspati, sia come plagioclasi albite, generalmente in fase di alterazione. In subordine: muscovite, granati, clorite, biotite, minerali opachi, zirconi, glauconite e rara tormalina. la matrice è scarsa (< 5%, stadio submaturo) e il cemento è calcitico e in subordine argilloso/fillosilicatico".		
Caratteristiche fisico-meccaniche:	EN 13755:2008 (assorbimento d'acqua dolce a pressione atmosferica)	1.85	%
	EN1936:2007 (massa volumica apparente)	2590	kg/m^3
	EN1936:2007 (porosità aperta)	4.97	%
	EN 12372:2007 (resistenza a flessione con carico concentrato)		
	allo stato naturale	12.9	MPa
	dopo 48 cicli di gelo	11.7	MPa
	EN 1926:2007 (resistenza alla compressione)	115.6	MPa

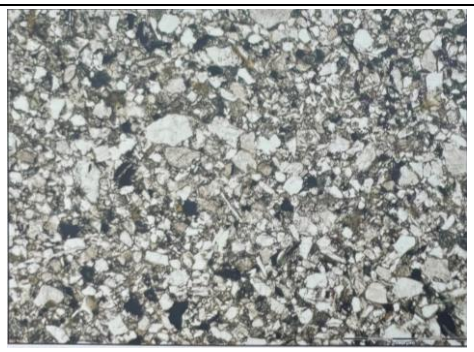


Figura 6- Sezione sottile x2(Regione Toscana et al., n.d.)

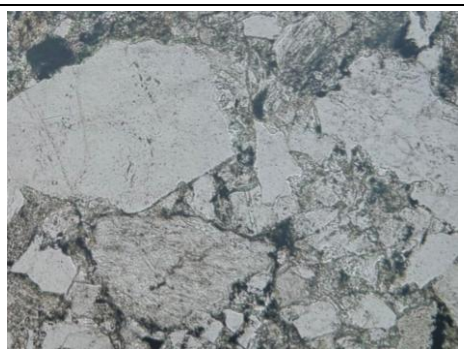


Figura 7- sezione sottile x10 (Regione Toscana et al., n.d.)

La Pietra di Santa Brigida, detta anche Arenaria di Monte Senario, ha origine torbiditica, e di età oliogocenica inferiore, appartiene al Complesso di Canetolo (Unità Subligure) ed è generalmente posta tettonicamente sopra la Formazione del Macigno (Regione Toscana et al., n.d.). Gli affioramenti sono presenti, seppur con estensioni limitate, nella zona montuosa tra Firenze e il Mugello (Appennino settentrionale), in particolare nei dintorni di Firenze, si trova a "Monte Senario, Polcanto, Santa Brigida, Monte Giovi e in un piccolissimo affioramento sulle colline di Scandicci nei pressi di Mosciano; affiora inoltre

nel Valdarno Superiore, nel Casentino e in Val Marecchia.[…] Le Arenarie di Monte Senario sono caratterizzate da un'alternanza di arenarie e argilliti con intercalazioni di lenti conglomeratiche" (Cipriani et al., 2005).

Di seguito in Tabella 4, elenco riassuntivo delle informazioni tecniche più rilevanti, estrapolate dal libro *The Tuscan stone identities*. [S.l.]: Regione Toscana e integrate con i risultati riportati nell'articolo di Cipriani et al. (2005).

Tabella 4- Tabella riassuntiva delle proprietà della Pietra di Santa Brigida (Regione Toscana et al., n.d.)

Nome tradizionale:	Pietra di Santa Brigida		
Altri nomi commerciali:	Macigno di Monte Senario/ Arenarie di Monte Senario		
Luogo d'origine:	Pontassieve (Firenze)		
Nome petrografico (secondo EN 12407):	litarenite (arenite da feldspatica a litica)		
Colore:	grigio-azzurrognolo-avana		
Descrizione macroscopica:	"litotipo sedimentario, a grana media con esili macchiettature nere e madreperlacee. Ha un aspetto omogeneo e compatto. In cava, al taglio fresco, colore azzurrognolo che poi in opera si trasforma in grigio chiaro-azzurrognolo"		
Descrizione microscopica (secondo EN 12407 e EN 12670):	"arenaria eterogenea, compatta, a grana medio-grossolana (0,11÷5 mm): dal punto di vista dimensionale è mediamente selezionata, con tessitura anisotropa per l'isoorientazione dei granuli più allungati e con granuli subangolosi, in subordine arrotondati. La frazione clastica, che presenta maturità composizionale, è rappresentata da abbondanti litoclasti (55%) olocristallini silicatici di differente tipologie anche se prevalentemente scistose anche a clorite, e quarzitiche; quarzo (35%) monocristallino; feldspati (10%), come k-feldspato microclino generalmente sano e plagioclasi geminati albitici, spesso deformati e in via di alterazione. sono presenti frammenti di intraclasti bacinali e di bioclasti e minerali opachi prevalentemente come diffusa granulazione. In tracce compaiono abbondanti miche-generalmente deformate-costituite da muscovite e in subordine da biotite e clorite, glauconite e granati. La matrice è scarsa (< 5%, stadio sub maturo) e il cemento è misto. legante è prevalentemente argilloso, ricristallizzato con una non trascurabile quantità di cemento calcitico; cemento carbonatico (7,2%) e di calcite di sostituzione (7,4%)"		
Caratteristiche fisico-meccaniche:	EN 13755:2008 (assorbimento d'acqua dolce a pressione atmosferica)	1.53	%
	EN1936:2007 (massa volumica apparente)	2610	kg/m^3
	EN1936:2007 (porosità aperta)	3.78	%
	EN 12372:2007 (resistenza a flessione con carico concentrato)		
	allo stato naturale	15.2	MPa
	dopo 48 cicli di gelo	13.7	MPa
	EN 1926:2007 (resistenza alla compressione)	103	MPa

Figura 8- Sezione sottile x2(Regione Toscana et al., n.d.)

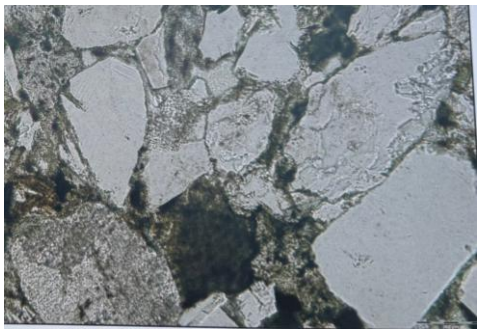


Figura 9- Sezione sottile x10 (Regione Toscana et al., n.d.)

Fino ad oggi, si presume un suo utilizzo, unicamente locale, ad esempio nel Convento di Monte Senario e Pieve di San Martino a Lobaco, entrambi del XIII secolo, e in buono stato di conservazione, non essendoci notizie storiche del suo impiego a Firenze (Cipriani et al., 2005). Solo in tempi recenti questa pietra è stata ufficialmente impiegata a Firenze per sostituire elementi deteriorati in edifici storici come le scalinate di accesso a Villa Fabbricotti, parti ornamentali sul campanile di Santa Maria Novella, alcuni tratti del cordonato delle scalinate esterne al Loggiato degli Uffizi, scalinate alla base della fontana del Carciofo nel Giardino di Boboli e alcune specchiature sotto le finestre, originariamente in Pietra Bigia, del Palazzo Pandolfini, integrandosi perfettamente con la Pietra Serena originale (Cipriani et al., 2005). Anche in questi casi, a diversi anni di distanza, gli interventi non mostrano significativi segni di degrado e si integrano perfettamente con la Pietra originaria (Cipriani et al., 2005).

Le due pietre, dal punto di vista composizionale, estetico e fisico-meccanico sono molto simili tra loro e ciò permette la loro interscambiabilità nell'ambito dell'architettura e del restauro. Ovviamente è possibile distinguerle tramite un'analisi petrografica modale, come è possibile osservare dal diagramma in Figura 10 (Cipriani et al., 2005); ciò potrebbe risultare utile per verificare il possibile utilizzo passato della pietra, non documentato, come sostituta della Serena deteriorata.

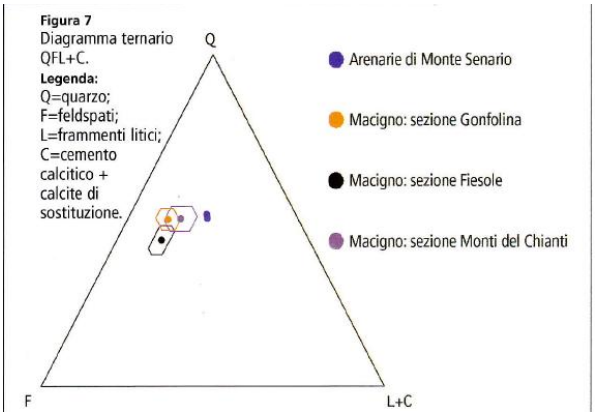


Figura 10- Diagramma QFL+C delle Arenarie di Monte Modino e del Macigno (Cipriani et al., 2005).

La Pietra Macigno dell'Oligocene appartiene alla formazione del Macigno ed il suo utilizzo viene ampiamente documentato a partire dal Quattrocento (Regione Toscana et al., n.d.).

Di seguito in Tabella 5, elenco riassuntivo delle informazioni tecniche più rilevanti, estrapolate dal libro *The Tuscan stone identities*. [S.l.]: Regione Toscana.

Tabella 5- Tabella riassuntiva delle proprietà della Pietra Macigno (Regione Toscana et al., n.d.)

Nome tradizionale:	Pietra Macigno		
Altri nomi commerciali:	Macigno di Greve		
Luogo d'origine:	Greve in Chianti (Firenze)		
Nome petrografico (secondo EN 12407):	litarenite		
Colore:	grigio-verde		
Descrizione macroscopica:	litotipo sedimentario di colore grigio dall'aspetto eterogeneo per la presenza di indistinte venature scure dovute a locale granulometria più fine, Macchiettato da individui di colore nero anche sub millimetrici e madre perlacei. La grana è media, la roccia è compatta ma mostra una spiccata porosità superficiale.		
Descrizione microscopica (secondo EN 12407 e EN 12670):	arenaria eterogenea a grana medio-fine (0,1÷1 mm). Dal punto di vista dimensionale è poco selezionata e ha tessitura anisotropa per l'isoorientazione dei granuli allungati. La frazione clastica presenta maturità composizionale ed è costituita da quarzo (55%) monocristallino e policristallino. Nel primo caso prevalentemente limpido o in subordine con inclusi bollosi o ematitici e a estinzione ondulata; frammenti litici (40%) sono costituiti da litotipi olocristallini sia silicatici (scisti, quarziti) e sia calcarei (marmi) e in subordine da frammenti micritici; feldspati (5%) di tipo k-feldspato microclino,sano, e da albite solitamente molto alterata (calcitizzata). Inoltre, presenti: muscovite, clorite, biotite, abbondanti zirconi, minerali opachi di tipo magnetitico, epidoti, apatite e granati. la matrice è scarsa (< 5%, stadio submaturo) e il cemento è calcitico e in subordine fillosilicatico/argilloso.		
Caratteristiche fisico-meccaniche:	EN 13755:2008 (assorbimento d'acqua dolce a pressione atmosferica)	1.43	%
	EN1936:2007 (massa volumica apparente)	2620	kg/m^3
	EN1936:2007 (porosità aperta)	3.69	%
	EN 12372:2007 (resistenza a flessione con carico concentrato)		
	allo stato naturale	14.9	MPa
	dopo 48 cicli di gelo	14.1	MPa
	EN 1926:2007 (resistenza alla compressione)	90.3	MPa

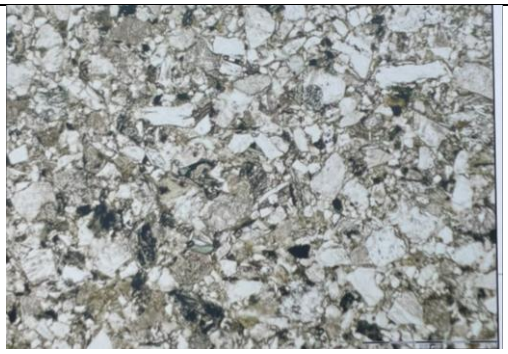


Figura 11- Sezione sottile x2(Regione Toscana et al., n.d.)

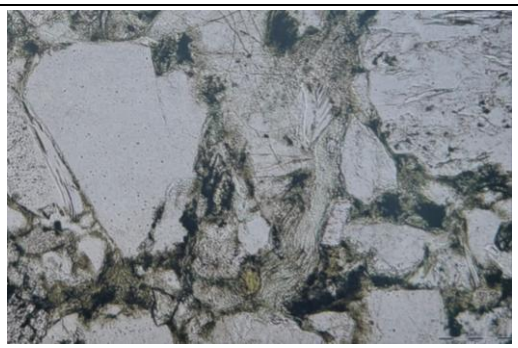


Figura 12- Sezione sottile x10(Regione Toscana et al., n.d.)

Tra le altre arenarie toscane devono essere citate infine:

- la Pietra Santafiora, arenaria calcareo-quarzosa-feldspatica, con circa il 45% di carbonati e tonalità che variano dal grigio al bruno giallastro, proveniente dalla formazione miocenica dell'arenaria di Manciano, affiorante in modo discontinuo tra la Toscana meridionale e il Lazio nord-occidentale (Regione Toscana et al., n.d.).

- la Pietra di Matraia, della formazione del Macigno, estratta nella provincia di Lucca, in cui è stata largamente utilizzata nell'architettura sin dal Medioevo (Regione Toscana et al., n.d.).
- la Pietra Cardoso, una pietra grigia dello pseudo-macigno delle Apuane, di età oligocenica superiore e con caratteristiche metamorfiche lievi, dal comune di Stazzema; caratterizzata dall'alternarsi di strati arenaceo-siltitici e pelitico-arenacei, noti anche come "ardesia apuana" (Regione Toscana et al., n.d.).

Oltre alle suddette pietre, alla fine dell'Ottocento, cominciò ad affermarsi, nei restauri e nelle decorazioni in rilievo, l'utilizzo della "Pietra artificiale", imitazione fedele della Pietraforte e della Pietra Serena ma più economica e resistente al degrado. L'accuratezza con cui viene realizzata, talvolta rende davvero difficile distinguerla dalle originarie, anche dopo attenti esami. L'idea di utilizzare e realizzare materiali alternativi risale al Rinascimento e si diffonde durante il Barocco, con l'utilizzo di malte di calce aerea; alla fine dell'Ottocento vengono impiegate malte cementizie, le quali grazie al cemento che ne riduce la porosità, presentano una resistenza al degrado superiore (Sartori, 2002).

Si arriva all'impiego della Pietra artificiale nel restauro solo nei primi anni del Novecento come documentato in un articolo di Guido Carocci apparso su "La Nazione" in cui vengono citati i lavori alle metope del palazzo Grifoni (Budini-Gattai) in Via dei Servi e Piazza SS. Annunziata, alle zoccolature del palazzo Corsi, in Via Tornabuoni, dell'ex convento degli Scolopi in Via Martelli, e della Biblioteca Marucelliana) (Sartori, 2002).

Un'altra pietra naturale sedimentaria di origine torbiditica, ampiamente diffusa nel territorio, è la Pietra Alberese. Di natura calcareo-marnosa, si distingue per una buona resistenza; tuttavia, il suo impiego diretto nelle costruzioni è piuttosto raro, a causa della maggiore diffusione delle altre due arenarie fiorentine, e viene perciò utilizzata principalmente per la produzione della calce (Sartori, 2002).

Pietra Bigia

Nel XIX secolo Targioni Tozzetti notò che Pietra Serena e Pietra Bigia, pur distinguendosi per colore, quantità di cemento e resistenza agli agenti atmosferici, sono "porzioni della stessa pietra", appartengono alla stessa formazione tettonico-stratigrafica (Sartori, 2002). La Serena si presenta con un grigio ceruleo-bluastro ed è mediamente più fragile della Bigia, che si distingue per il colore marrone-terroso o "leonato sudicio" (Sartori, 2002) come definito dal Targioni Tozzetti stesso, il quale sosteneva che ciascuna

avesse due varietà, una a grana più grossa, più durevole, e l'altra a grana più fine, come è stato confermato dai campioni estratti al fine di condurre tale studio. Ciò che le accomuna, oltre alle origini litologiche, sono la loro facile lavorabilità ed i siti di estrazione.
Nella Bigia, il degrado si manifesta quasi sempre come arenizzazione superficiale, ovvero per decoesione totale dei granuli che si manifesta con uno sfarinamento della superficie, più raramente si ha esfoliazione (Sartori, 2002). La sua modalità di degrado, la rende più facilmente distinguibile dalla Pietraforte che ha un colore molto simile; inoltre, la Pietraforte presenta altre particolarità caratterizzanti, che permettono di identificarla come il particolare disegno superficiale a convoluzioni, le visibili vene di calcite spatica e la grana tendenzialmente più fine (Sartori, 2002).
Seppur meno nota e studiata, la variante Bigia viene citata in diversi fonti storiche, per esempio da Agostino del Riccio nella Istoria, per elogiarne le "facciate, finestre, usci ma in particolari le finestre inginocchiate" realizzate con il materiale lapideo estratto da Fiesole (Sartori, 2002); secondo Filippo Baldinucci la qualità migliorava man mano che si scavava in profondità, sia per la Pietra Bigia che per la Serena, descrivendone il loro alternarsi in cava (Sartori, 2002).
È stata particolarmente impiegata tra il Cinquecento e il Settecento grazie alla somiglianza estetica con la più costosa Pietraforte, per la sua buona lavorabilità oltre alla sua presupposta maggiore resistenza rispetto alla Serena (Sartori, 2002).
Di seguito, oltre alla documentazione fotografica delle cave storiche di Monte Ceceri, della Vale del Mugnone e di Tavarnuzze e dei Palazzi e monumenti fiorentini in Pietra Bigia e non solo, si procede con la descrizione dei metodi utilizzati per valutare e calcolare tutti quei parametri utili per poterla confrontare con la ben più nota e studiata Pietra Serena e per capirne i processi di degrado a cui è andata in contro durante questi secoli.

1.4. Sopralluoghi nelle cave storiche e nel centro storico di Firenze

Cave storiche sul Monte Ceceri (Fiesole)

In passato, le colline fiesolane erano un "luogo copioso di sassi e per tutto pieno di cave di macigni, che son lavorati di continovo da' scarpellini e scultori" citando Giorgio Vasari e lo stesso Boccaccio le descriveva come un "immenso cumulo di pietre macchiato dal

colore plumbeo delle cave che incombevano su Firenze" (Fratini et al., 2014). Ad oggi le colline non sono più grige e rocciose ma ospitano il Parco di Monte Ceceri (di circa 44 ettari) (Visit Tuscany, n.d.), grazie ad una campagna di rimboschimento iniziata negli anni Trenta; tale area, di proprietà della Fattoria di Maiano, è classificata come zona ANPIL (Area Naturale Protetta a Interesse Locale) (Toscanatura.it, n.d.).

Il Parco di Monte Ceceri è attraversato dai numerosi sentieri del CAI, che permettono di scoprire la zona e raggiungere luoghi storici e simbolici come la Cava del Braschi (vedi Figura 20), interessante per le colonne in Pietra Serena che sorreggono la volta della cava, oggi non più accessibile. I sentieri raggiungono anche la Cava Sarti e molte altre cave ormai tutte abbandonate, fino al piazzale panoramico conosciuto come Piazzale Leonardo, dove si presume che Leonardo Da Vinci abbia condotto l'esperimento del volo umano.

A partire dal XVI secolo l'attività estrattiva del territorio fu regolamentata e ridotta, nei primi anni del secolo scorso iniziarono a chiudere le prime cave, mentre le ultime sono state abbandonate alla fine degli anni 60, probabilmente l'ultimo materiale estratto è stato utilizzato per alcuni elementi architettonici interni alla Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze (Istituto e Museo di Storia della Scienza, 2008).

Durante il sopralluogo è stato possibile apprezzare le numerose pareti delle cave storiche, segnate dalle lavorazioni passate degli scalpellini (vedi Figure 17 e 18). Tuttavia, molte di queste pareti sono macchiate dalla vegetazione e dalla terra, rendendo difficile riconoscere la Pietra Bigia. Principalmente è stata riconosciuta la Pietra Serena, probabilmente perché la Bigia, essendo una sua varietà dovuta a processi geologici indotti da agenti esogeni (piogge, acque percolanti, variazioni termiche), già in passato diventava sempre più rara e difficile da trovare, quanto più l'attività estrattiva si approfondiva (Pietre di Rapolano, 2021); uno degli ultimi usi più importanti in Pietra Bigia è stato l'arco dei Lorena in Piazza della Libertà, risalente al XVIII secolo (Pietre di Rapolano, 2021).

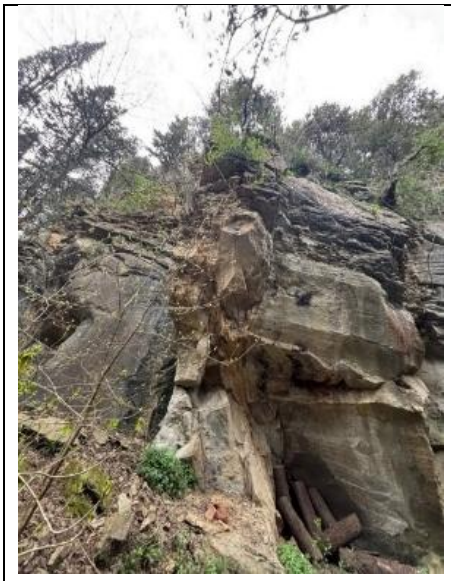


Figura 13

Figura 14

Figura 15

Figura 16

Figura 17

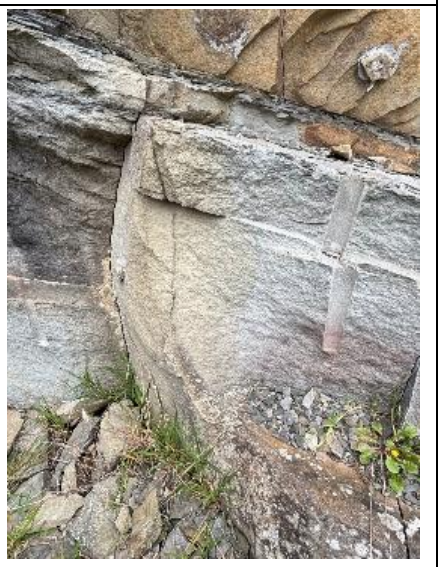


Figura 18

Figura 19

Cave storiche nella Val del Mugnone (Firenze)

A pochi chilometri di distanza dalle cave fiesolane, sono presenti diversi affioramenti delle arenarie del Macigno lungo la valle del Mugnone.
Percorrendo via Faentina sono pochi i punti di accesso agli storici fronti di cava e a causa del fiume Mugnone che divide la valle e dei cancelli delle numerose proprietà private non è stato possibile avvinarsi alle pareti rocciose. Di seguito sono riportate alcune foto scattate durante il sopralluogo ed un'immagine acquisita da Google maps (Figura 23) utile per avere un inquadramento geografico generale e per sottolineare la breve distanza tra Pian del Mugnone, Monte Ceceri e Firenze. Gli unici punti di accesso sono stati trovati in prossimità di tali coordinate: (43.80774360222485, 11.28048370680229) (Figura 23) e (43.81280990668908, 11.287036136046966) (Figura 24).

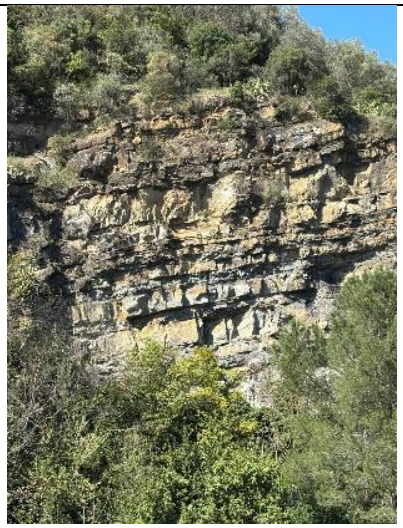


Figura 20

Figura 21

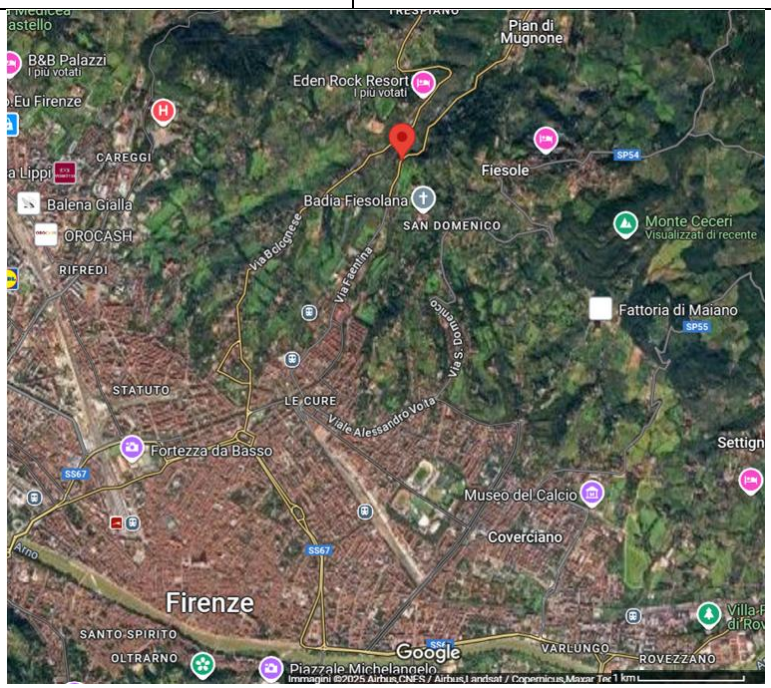


Figura 22

Figura 23-accesso in corrispondenza delle coordinate (43.80774360222485, 11.28048370680229), accanto all'edificio in Via Faentina con civico 57

Figura 24-accesso in corrispondenza delle coordinate (43.81280990668908, 11.287036136046966).

Cava storica Poggio a' Grilli a Tavarnuzze (Impruneta)

Tavarnuzze è una frazione del comune italiano di Impruneta, a sud di Firenze (Figura 31). Anche in questo caso, come nei sopralluoghi precedenti, non sono stati trovati alcun fronte di cava o parete rocciosa in Pietra Bigia. L'accesso alla storica cava Poggio a'Grilli è stato semplice. La prima parete rocciosa incontrata è stata trovata completamente annerita, probabilmente da un incendio (Figura 25): per capire meglio è stata scalfita tramite scalpello e martello e dal colore e tessitura si presume fosse Pietra Serena. Proseguendo nell'indagine è stata trovata un'altra parete completamente franata (Figura 26), i cui massi crollati erano in Pietra Serena e quelli di colore simile alla Pietra Bigia molto friabili, appena sollecitati con martello e scalpello si disintegravano. Materiale simile, nel colore e nella friabilità/fragilità è stato trovato anche in alcune parete delle cave di Monte Ceceri. In prossimità di queste pareti rocciose vi è un muretto in pietra Serena e Bigia (Figura 27), il quale insieme a qualche masso di piccole dimensioni trovato a terra (Figure 28, 29 e 30), rappresenta una testimonianza della precedente attività estrattiva locale di Pietra Bigia.

Figura 25

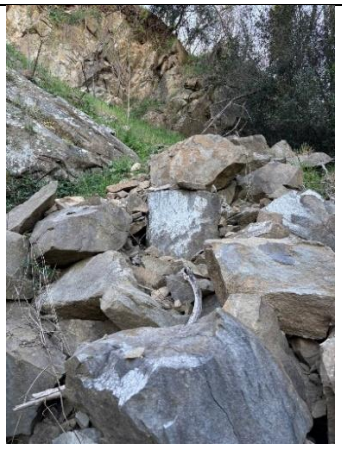


Figura 26

Figura 27

Figura 28

Figura 29

Figura 30

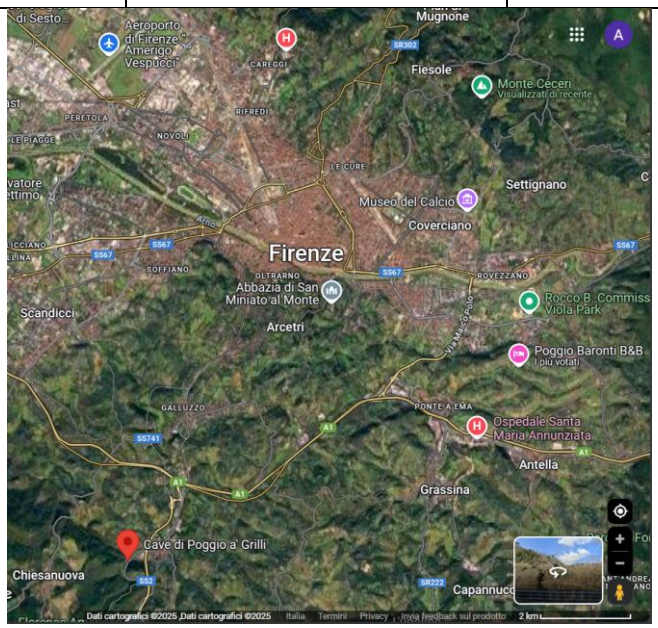


Figura 31

L’ ordine in cui sono presentati gli edifici ispezionati in fase di studio nel centro storico di Firenze e a Fiesole, non è per importanza, ma solo un possibile percorso per visitarli più facilmente.

Arco di Trionfo dei Lorena

(P.za della Libertà, 50129 Firenze FI)

L’Arco di Trionfo dei Lorena, posizionato al centro di Piazza della Libertà a Firenze e costruito tra il 1737 e il 1739, è un maestoso portale neoclassico celebrativo per il Granduca Francesco Stefano di Lorena, primo sovrano asburgico dopo la fine della dinastia medicea, testimonianza dunque del passaggio di potere nel Granducato di Toscana.

Progettato dall’architetto francese Jean Nicolas Jadot, l’arco si presenta con tre fornici, dodici colonne corinzie alte 14 metri, sedici statue allegoriche, bassorilievi e trofei d’armi, coronato dalla statua equestre del Granduca opera di Vincenzo Foggini sulla sommità.

Il monumento è realizzato principalmente in Pietra Bigia; nel corso dei secoli, l’arco ha necessitato di numerosi interventi di restauro, l’ultimo risale al 1994-1995, durante il quale sono state impiegate anche pietre artificiali (in particolare per la superficie esfoliata delle colonne) per mantenere l’aspetto originale migliorandone le qualità prestazionali.

Durante i mesi dedicati al seguente studio, non è stato possibile osservare da vicino gli elementi dell’Arco ed effettuare una documentazione fotografica adeguata a causa della presenza di impalcature, a conferma della storica fragilità del monumento anche ad oggi è interessato da lavori restaurativi e da ciò che è stato possibile vedere, sembrerebbe essere soggetta a disgregazione granulare (base della colonna in Figura 33).

Figura 32

Figura 33

Figura 34

Figura 35

Chiesa di Sant'Agata

(Via San Gallo, 108n - 50129 Firenze (FI))

La chiesa di Sant'Agata, situata in via San Gallo a Firenze, fu fondata come monastero femminile camaldolese alla fine dell'XI secolo. Nel corso dei secoli ha ospitato diversi ordini monastici e subito numerose trasformazioni, tra cui la conversione in ospedale militare durante le soppressioni napoleoniche e leopoldine, fino alla chiusura agli inizi degli anni 2000. La facciata, rifatta tra il 1582 e il 1597 su richiesta del senatore Lorenzo di Piero de' Pucci su progetto di Alessandro Allori, è un esempio di stile manierista. Essa presenta una struttura a capanna con lesene tuscaniche rustiche sul portale, un frontone, una decorazione (laterale) a scacchiera di fasce e lo stemma dei Pucci principalmente in

Pietra Bigia. Nel 2024, grazie a un restauro sostenuto dalla comunità libanese e alla disponibilità dell'Arcidiocesi di Firenze, la chiesa è stata riaperta e consacrata come parrocchia di Sant'Charbel Makhluf dei libanesi maroniti.

Gli elementi in facciata in Pietra Bigia, non sono in uno stato di conservazione ottimale, hanno subito nel tempo una disgregazione granulare che ha reso la loro superficie ruvida e ha portato alla perdita di dettagli decorativi, come è possibile osservare nello stemma e nel timpano; in particolare le parti più aggettanti risultano quelle più rovinate. In Figura 39, risulta evidente il passaggio tra Pietra Bigia e Pietra Serena.

Figura 36

Figura 37

Figura 38

Figura 39

Figura 40

Figura 41

Palazzo di San Clemente (Biblioteca Di Architettura-Università Degli Studi Di Firenze)
(Università degli Studi di Firenze, Via Pier Antonio Micheli, 2, 50121 Firenze FI)

Il Palazzo di San Clemente, situato a Firenze in via Pier Antonio Micheli angolo via Gino Capponi, è un edificio storico la cui origine risale al Cinquecento. Nel 1634 la proprietà passò alla famiglia Guadagni, che affidò all'architetto Gherardo Silvani la ristrutturazione dell'edificio e del giardino (1644), trasformandolo in una villa suburbana di tipo "casino". Nel corso dei secoli, si susseguirono diversi proprietari, da Carlo Edoardo Stuart, pretendente giacobita al trono di Inghilterra, Scozia, Irlanda e Francia, a Simone Velluti Zati, duca di San Clemente, da cui prende il nome attuale. Dal 1901 rientra nei monumenti tutelati a livello nazionale, dal 1924 è sottoposto a vincolo architettonico e dal 1960 ospita la Facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze.
Gli elementi decorativi della facciata e la maggior parte delle originarie ventisette statue poste su piedistalli raffiguranti cacciatori, animali e scene di lotta presenti nel giardino, o almeno ciò che ne rimane, sono principalmente in Pietra Serena e in Pietra Bigia (De Silva & Lambertini, 2008).
Oggi queste statue si presentano, così come la facciata, in uno stato di grave degrado: molte sono frammentarie e hanno subito distacchi o sono state danneggiate da fenomeni di esfoliazione, fessurazione, erosione e attacchi biologici. Tali problemi si sono accentuati a causa dell'incuria e dello stato di abbandono del giardino e della sua vegetazione prolungato per diversi anni (De Silva & Lambertini, 2008). La statua meglio conservata è quella in Figura 44, una delle poche per cui avrebbe senso compiere interventi di restauro e consolidamento, dal momento che delle altre non è rimasto nemmeno la forma di ciò che sono state. Nel 2005 è stato effettuato un censimento dettagliato e nel 2006 sono stati avviati interventi preliminari di pulitura e consolidamento su sei statue, le cui spese sono state sostenute dall'Ufficio Pianificazione, Lavori e Progettazione dell'Università di Firenze (De Silva & Lambertini, 2008).
Nonostante il valore storico e architettonico, la conservazione generale della facciata del palazzo, sia su Via Micheli che sul giardino interno ad oggi è considerabile mediocre se non pessimo.

Figura 42

Figura 43

Figura 44

Figura 45

Figura 46

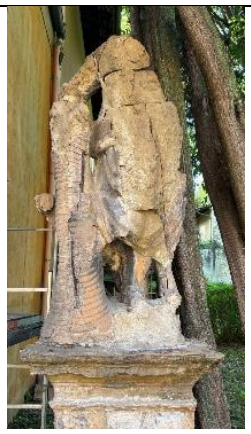


Figura 47

Palazzo Zuccari

(Via Giuseppe Giusti, 43, 50121 Firenze FI)

Il Palazzo Zuccari, situato in via Giuseppe Giusti 43 a Firenze, si contraddistingue per la sua facciata unica in Pietra Bigia, disposta in blocchi di forme e dimensioni irregolari. Il bugnato in facciata, alternato a laterizi, riflette il gusto artistico di Federico Zuccari, che nel 1577-78 trasformò il palazzo in abitazione e bottega.

Il palazzo, oltre che per la facciata, si distingue per la sua struttura fuori scala, alto e stretto, rispetto agli edifici vicini ed è stato dimora, oltre che di Zuccari, anche di altri importanti pittori fiorentini come Andrea del Sarto e Giovan Battista Paggi. Dal 1987, dopo essere stato acquistato dalla Deutsche Bank e donato a un'associazione culturale, il palazzo appartiene all'Associazione degli Amici del Kunsthistorisches Institut, che ne ha curato il restauro e la conservazione.

Anche in questo caso lo stato di conservazione può essere ritenuto mediocre, le componenti della facciata in Pietra Bigia risultano rovinati per disgregazione granulare ed esfoliazione.

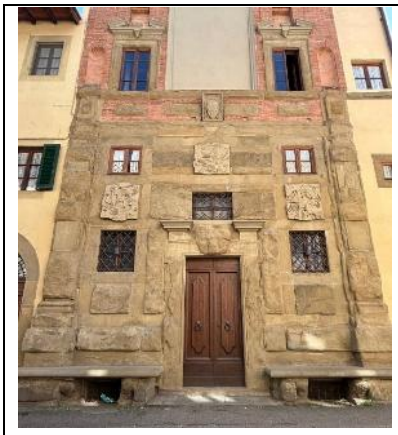


Figura 48

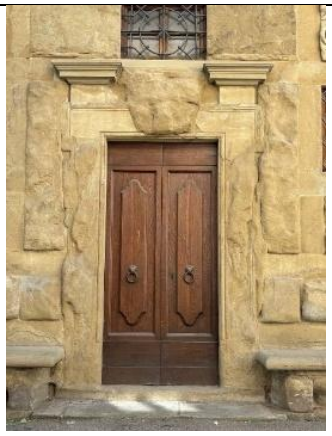


Figura 49

Figura 50

Figura 51

Figura 52

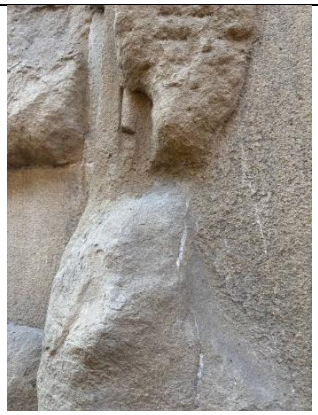


Figura 53

Palazzo Budini Gattai

(*Via Dei Servi 51 - 50100 Firenze (FI)*)

Il Palazzo Budini Gattai, situato in via dei Servi nel centro storico di Firenze, è una residenza signorile rinascimentale costruita a partire dalla metà del Cinquecento. La costruzione iniziò con il progetto di Giuliano di Baccio d'Agnolo e fu portata avanti tra il 1563 e il 1574 da Bartolomeo Ammannati, allievo di Michelangelo. Nel corso dei secoli il palazzo fu ampliato e restaurato, mantenendo intatto il suo prestigio storico e artistico, tanto da essere riconosciuto nel 1901 come patrimonio artistico nazionale. Attualmente è

una location prestigiosa per eventi privati, apprezzata in particolare per i suoi giardini privati abbelliti da fontane e sculture.

La facciata dell'edificio è caratterizzata dall'uso della Pietra Bigia nelle bugne angolari e nelle finestre inginocchiate che si affacciano sul lato di piazza Santissima Annunziata. Lo stato di conservazione è abbastanza buono, tuttavia gli elementi più aggettanti come le mensole (gli elementi curvilinei come quello in Figura 56), i davanzali o i timpani sopra le cornici modanate delle finestre sono i più soggetti al distacco e alla disgregazione granulare. Le bugne angolari, più massicce sono soggette ad una più leggere disgregazione e presentano lievi alterazioni cromatiche, in particolare di annerimento. La specchiatura, inoltre, in questo caso liscia, oltre ad essere stata rovinata da graffiti (Figura 58) risulta macchiata ed in alcuni punti incrostata, vittima del degrado cittadino. Anche il basamento in pietra risulta esfoliato e disgregato, oltre ad essere macchiato ed aver subito una forte alterazione cromatica. Nella mensola in Figura 56 risulta evidente il passaggio cromatico della Pietra Serena in Pietra Bigia.

Figura 54

Figura 55

Figura 56

Figura 57

Figura 58

Figura 59

Basilica San Marco

Camillo Benso Cavour 56 - 50129 Firenze (FI)

La Basilica di San Marco, situata nel centro storico di Firenze, tra via Camillo Benso Cavour e Piazza San Marco, ha una facciata neoclassica realizzata tra il 1777 e il 1778 dal frate Giovan Battista Paladini. Originariamente ospitava un monastero vallombrosano fin dal XII secolo; successivamente passò ai monaci Silvestrini e infine ai Domenicani osservanti, che nel XV secolo, grazie al sostegno di Cosimo il Vecchio, avviarono importanti lavori di ristrutturazione affidati all'architetto Michelozzo. Nei secoli successivi la basilica fu ampliata e decorata anche da artisti come Giambologna, mantenendo nel tempo il suo aspetto monumentale. Il portale rinascimentale, con i suoi piedritti a bugne, i capitelli scolpiti, l'architrave orizzontale ed il frontone triangolare (in Figura), la base e le bugne angolari (in figura) su via Camillo Benso Cavour ed angolo Piazza San Marco, sono in Pietra Bigia e presentano i soliti aspetti di degrado: disgregazione ed esfoliazione degli elementi più aggettanti ed esposti (il timpano nel caso del portale in Figura 60). La base dell'edificio della facciata principale che si sviluppa su tre ordini in Piazza San Marco è invece principalmente in Pietraforte, riconoscibile per le sue convoluzioni e venature tipiche. Nelle figure 62,63 e 64 è evidente il netto contrasto e la diversità tra la Pietra Bigia (a sinistra) e la Pietraforte (a destra).

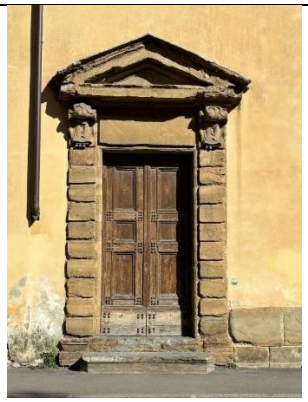


Figura 60

Figura 61

Figura 62

Figura 63

Figura 64

Palazzo Capponi Covoni

(*Via Camillo Cavour 8 - 50129 Firenze (FI)*)

Il Palazzo Capponi-Covoni, situato in via Cavour 4-6 a Firenze, fu costruito nel 1623 su commissione di Piero Capponi dall'architetto Gherardo Silvani. Nel 1734, il palazzo fu ampliato unendo, tramite lavori dell'architetto Clemente Orlandi, l'attiguo Palazzo Milanesi; le facciate rimasero però stilisticamente disomogenee.

Nel corso dell'Ottocento il palazzo passò alla famiglia Covoni e in seguito, nel 1896, alla famiglia Daneo. Dal 1974 è sede di uffici della Regione Toscana e dal 2000 del Parlamento regionale degli studenti. Negli anni recenti il palazzo è stato restaurato per preservarne la struttura originale e adattarlo a funzioni moderne. Gli elementi decorativi, tra cui le finestre inginocchiate e le cornici sono in Pietra Serena, lo stato conservativo è piuttosto buono. È tuttavia possibile osservare fenomeni di disgregazione sui davanzali delle finestre inginocchiate (Figura 66), principalmente in corrispondenza dell'attaccatura delle grate in ferro (Figura 67), alterazione cromatica e macchie sullo zoccolo basale

(Figura 68), macchie e graffiti sulla specchiatura delle inginocchiate (Figura 69) ed alcune mensole (Figura 70) sono fratturate e hanno subito distacco di materiale.

Figura 65

Figura 66

Figura 67

Figura 68

Figura 69

Figura 70

Palazzo Medici Riccardi

(*Via Camillo Cavour, 1 - 50129 Firenze (FI)*)

Palazzo Medici Riccardi, situato tra via Camillo Benso Cavour e via dè Gori a Firenze, fu progettato dall'architetto Michelozzo su incarico di Cosimo il Vecchio tra il 1444 e il 1452. Rappresenta un modello fondamentale dell'architettura civile rinascimentale fiorentina e fu la residenza principale della famiglia Medici fino al 1540. L'edificio, durante i mesi in cui è stato condotto lo studio, è stato circondato da impalcature, limitando la possibilità di verificare il presente uso di Pietra Bigia. Gli unici elementi osservabili sono in Pietraforte, come è possibile vedere dalle immagini sottostanti (Figura 71, 72 e 73). La sola facciata libera e ben visibile dell'edificio è quella "posteriore" su Via De' Ginori, in cui è stato osservato un intonaco decorato ad imitazione di elementi lapidei (Figura 74 e 76).

Figura 71

Figura 72

Figura 73

Figura 74

Figura 75

Figura 76

Palazzo Orlandini Del Beccuto

(*Via De' Pecori 6 - 50123 Firenze (FI)*)

Il Palazzo Orlandini del Beccuto, noto anche come Palazzo Gondi di Francia, è un edificio civile situato all'angolo tra via de' Pecori 6-8 e via de' Vecchietti, nel centro storico di Firenze, riconosciuto patrimonio artistico nazionale. Sorto su preesistenze medievali e rinascimentali, l'attuale struttura risale a un progetto di trasformazione del 1679 dell'architetto Antonio Maria Ferri, con interventi significativi nel corso dell'Ottocento e del Novecento.

Nel corso dell'Ottocento, sotto la direzione dell'ingegnere Cesare Fortini, furono effettuati lavori che inclusero l'intonacatura delle superfici di bozze di pietra ai piani superiori, modificandone l'aspetto originario. Nei decenni successivi la facciata è stata restaurata e consolidata, anche in occasione dell'adattamento dell'edificio a uso bancario, dalla Monte dei Paschi di Siena, mantenendo e valorizzando gli elementi architettonici originari. Nel 2018 è stato posto in vendita dalla stessa Monte dei Paschi di Siena. Alcuni degli elementi architettonici, che caratterizzano la facciata dell'edificio, sono in Pietra

Bigia (Figura 78), altri in Pietraforte (specchiatura in Figura 79) e il bugnato probabilmente è in Pietra artificiale. Lo stato di conservazione è ottimo. Sola la base e qualche elemento in Pietra Bigia risulta parzialmente disgregato.

Figura 77

Figura 78

Figura 79

Chiesa dei Santi Michele e Gaetano

(*Piazza Degli Antinori 1 - 50123 Firenze (FI)*)

La chiesa dei Santi Michele e Gaetano, situata in piazza Antinori a Firenze, è uno degli esempi più significativi di architettura barocca nella città. Costruita tra il 1604 e il 1701 per l'ordine dei Chierici Regolari Teatini, con il sostegno di nobili famiglie fiorentine, tra cui i Medici, sorge sul luogo di una preesistente chiesa romanica dedicata a San Michele Arcangelo.

La facciata della chiesa, progettata da Gherardo Silvani e completata alla fine del XVII secolo, è principalmente in Pietraforte. Anche in questo caso, durante i mesi del seguente studio, non è stato possibile osservare la facciata nella sua interezza perché coperta da impalcature. Ciò che è stato possibile osservare sono degli elementi architettonici (Figure 80, 81 e 82) in Pietra Bigia e Serena in buono stato di conservazione, con solo qualche macchia superficiale (Figura 82). In alcuni elementi in Pietraforte, è possibile notare delle fratture (Figura 84) ed incisioni praticate come atto vandalico nei confronti dell'opera (Figura 83).

Figura 80

Figura 81

Figura 82

Figura 83

Figura 84

Figura 85

Palazzo Larderel

(Via de' Tornabuoni, 19, 50123 Firenze FI)

Palazzo Larderel, situato in via de' Tornabuoni 19 a Firenze, fu costruito nel 1580 su progetto di Giovanni Antonio Dosio per la famiglia Tebalducci Giacomini. La sua architettura si ispira al tardo Rinascimento romano; la facciata si presenta con finestre e un portale dotati di timpani, cornici e semicolonne e con bugnati agli spigoli in Pietra Bigia (Figura 86).

Nel corso del tempo la facciata è stata restaurata più volte, con interventi significativi nel XIX secolo e negli anni Sessanta del Novecento, volti a consolidare e preservare le parti più fragili in Pietra Bigia. Ad oggi il suo stato di conservazione è buono; si riscontrano le tipiche modalità di degradazione: disgregazione granulare ed esfoliazione sulla zoccolatura (Figura 94), sulle mensole e alla base delle colonne decorative come

osservabile nelle Figure 91 e 93, formazione di croste nere e macchie sulla specchiatura (Figure 87, 89 e 90) ed un leggero annerimento sulle bugne (Figura 88).

Figura 86

Figura 87

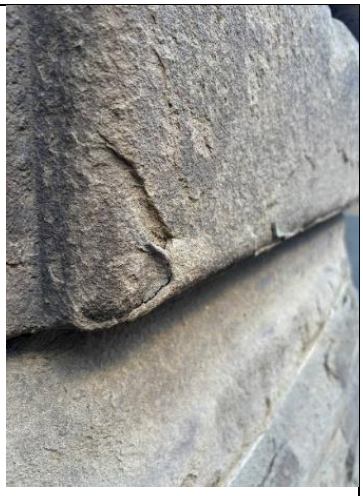


Figura 88

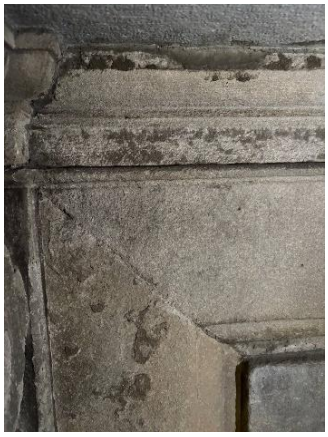


Figura 89

Figura 90

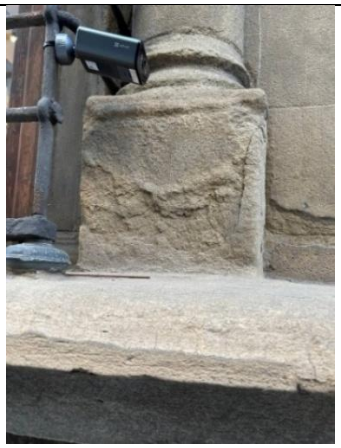


Figura 91

Figura 92

Figura 93

Figura 94

Palazzo Strozzi del Poeta

(*Via De' Tornabuoni 3 - 50123 Florence)*

Il Palazzo Strozzi del Poeta, detto anche Giaconi, si trova in via de' Tornabuoni 5 a Firenze. La facciata fu realizzata nel 1626 su progetto di Gherardo Silvani, per volere del letterato Giovan Battista Strozzi, che era solito riunire nel palazzo l'Accademia degli Alterati.

È stata realizzata in stile barocco fiorentino e si distingue per gli elementi architettonici (come i portali timpanati, il grande portale centrale con colonne e balcone soprastante, le cornici marcapiano, le finestre con timpani e lesene, e la balaustra del balcone) in Pietra Serena e Bigia su fondo intonacato chiaro (Figura 95). Il palazzo complessivamente è in buoni condizioni, le tipiche disgregazioni granulari della Pietra non sono eccessive (Figure 96 e 97), in alcuni punti sono presenti delle macchie.

Figura 95

Figura 96

Figura 97

Figura 98

Cattedrale di San Romolo

(*Via Vecchia Fiesolana 24 - 50014 Fiesole (FI)*

Il Duomo di Fiesole, o Cattedrale di San Romolo, fu fondato nel 1028 per volontà del vescovo Jacopo il Bavaro e completato nel corso del XIV secolo. L'edificio ha subito diversi ampliamenti e restauri, tra cui un intervento decisivo tra il 1878 e il 1883, che ne ridefinì in parte l'aspetto esterno, conferendo alla facciata elementi neogotici.

La struttura si presenta con uno stile romanico sobrio e compatto, caratterizzato da paramenti murari esterni in blocchi di Pietra Bigia e Serena squadrata a vista. In questo caso è davvero molto evidente il passaggio cromatico tra le due varietà della pietra.

Le foto sono state fatte principalmente al fianco rivolto su Piazza Mino.

L'edificio è in buone condizioni e sembra essere stato sottoposto a recenti interventi visto l'uso di vernici chiare che ricoprono alcuni dei paramenti murari in blocchi, esteticamente non troppo gradevole (Figura 102). Nonostante il buono stato complessivo della Chiesa, è possibile osservare i tipici segni di esfoliazione e disgregazione (Figure 100, 101, 103 e 104).

Figura 99

Figura 100

Figura 101

Figura 102

Figura 103

Figura 104

Teatro Romano di Fiesole

Via Portigiani, 1 - 50014 Fiesole (FI)

Il Teatro Romano di Fiesole è stato costruito tra la fine del I secolo a.C. e l'inizio del I secolo d.C. in una posizione panoramica che sfrutta il pendio naturale della collina secondo il modello greco, una scelta rara nell'architettura romana, ma che garantisce ancora oggi un'eccellente acustica e visibilità. Invero, il teatro continua ad ospitare eventi, mostre e attività didattiche, e rappresenta uno dei simboli archeologici più importanti della Toscana è uno dei monumenti più significativi e meglio conservati dell'antica Fiesole all'interno dell'Area Archeologica.

Tra la fine dell'Ottocento e l'inizio del Novecento il teatro fu oggetto di scavi e restauri. Le foto riportate sono esclusivamente dell'ingresso principale del teatro, l'area archeologica interna ed il teatro stesso non è stato visitato. Anche in questo caso si ha un perfetto esempio del passaggio cromatico della Pietra Bigia in Pietra Serena (Figure 105, 106 e 107).

Figura 105

Figura 106

Figura 107

2. Metodi e applicazioni

In questa sezione vengono descritte le prove di laboratorio effettuate sui campioni di Pietra Bigia prelevati nei pressi di Monte Ceceri (Fiesole).

Di seguito, sono riportate alcune fotografie fatte ai campioni numerati per la loro identificazione e riconoscimento, corredate, nel caso dei campioni #1, #2 e #4, da ulteriori foto utili per visualizzare la loro provenienza, ovvero il masso da cui sono state estratte. Queste ultime sono state incluse al fine di facilitare un inquadramento visivo più completo e l'interpretazione delle caratteristiche macroscopiche del materiale.

Nell'Appendice A sono riportate ulteriori fotografie dei campioni esaminati, con l'obiettivo di offrire, per quanto possibile, una visione completa e dettagliata di ciascuno.

Al fine di condurre le prove, sono stati tagliati i campioni, tramite sega a ponte con disco diamantato e raffreddamento in acqua, in 4 provini cubici (lato 50mm) dal campione #2 (a grana visibilmente più fine) e 3 dal campione #3 (a grana visibilmente più grossa). L'operazione è stata condotta senza particolari difficoltà, confermando la facilità di lavorazione di cui il materiale in esame e simili sono noti.

2.1. Campioni di Pietra Bigia

Campione #1

Figura 108

Figura 109

Figura 110

Figura 111

Figura 112

Campione # 2

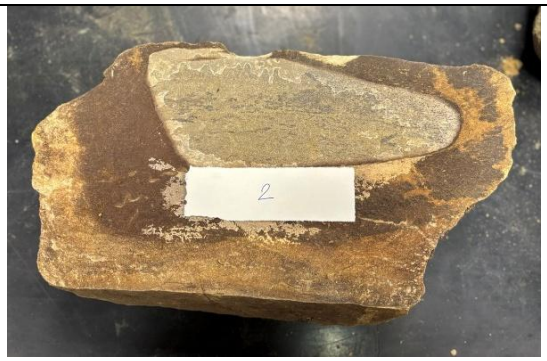


Figura 113

Figura 114

Figura 115

Figura 116

Figura 117

Figura 118

Campione #3

Figura 119

Figura 120

Figura 121

Figura 122

Figura 123

Campione #4

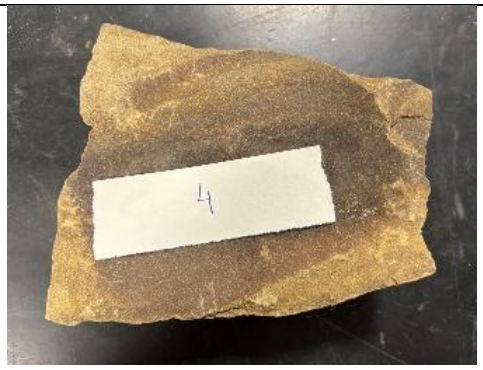


Figura 124

Figura 125

Figura 126

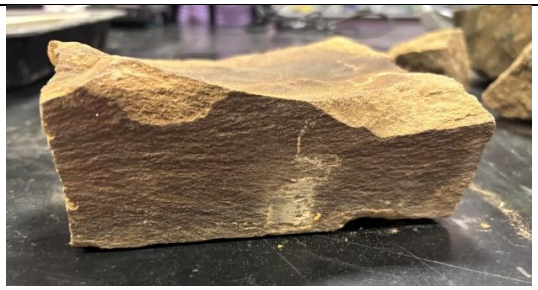


Figura 127

Figura 128

Figura 129

Campioni dalla Cava Poggio a' Grilli di Tavarnuzze

Figura 130

Figura 131

2.2. Prove eseguite in laboratorio

Esame petrografico

La procedura per l'analisi petrografica viene descritta nella norma EN 12407:2019, intitolata "Metodi di prova per pietre naturali – Esame petrografico". Di seguito verrà descritta la prova facendo riferimento alla EN 12407:2019. Il metodo prevede una prima osservazione macroscopica del campione, seguita dall'esame microscopico di una sezione sottile al microscopio a luce polarizzata.

Tramite valutazione macroscopica, da effettuare su campioni freschi appena fratturati, si osservano e descrivono gli aspetti relativi alla struttura (visibili a occhio nudo), la grana (ovvero dimensioni dei cristalli o dei grani costituenti), la presenza di macrofessure, l'eventuale stato di alterazione e altre osservazioni.

Attraverso l'esame microscopico, invece, è possibile osservare la "tessitura (forma, dimensioni, abito cristallino, disposizione reciproca dei cristalli o dei grani di una roccia tramite microscopio), le fasi mineralogiche (la loro natura e le loro caratteristiche, quali il tenore in volume, le dimensioni, l'abito, la forma, la distribuzione ecc.), l'eventuale massa vetrosa (omogenea, con cristalli inclusi, con nuclei o plaghe di cristallizzazione), i resti organici (fossili, resti vegetali, sostanze organiche varie), le discontinuità (pori, microfratture e loro eventuali trend direzionali) e il grado di alterazione" (Di Sivo, 2004).

In questa fase, attraverso l'analisi modale, si assegna una percentuale in volume per ciascuna fase mineralogica; ciò può essere fatto tramite conteggio puntuale secondo una procedura standard, tramite i diagrammi di Shvetsov (o altri diagrammi comunemente utilizzati dai petrografi) oppure tramite una valutazione visiva approssimata.
Le sezioni sottili, da preparare per l'osservazione microscopica, sono "una porzione di materiale montata su un vetrino e meccanicamente assottigliata fino a uno spessore di 0,030 ± 0,005 mm, e normalmente protetta da un coprivetrino" (EN 12407:201). Le dimensioni standard sono circa 44 mm × 28 mm.
Qualora la pietra esaminata fosse troppo friabile, per ottenere una sezione sottile, si ricorre ad una serie di processi, tra cui l'impregnazione con resine per consolidarla.
Inoltre, in alcuni casi, per facilitare l'identificazione di alcune componenti mineralogiche con colori o proprietà ottiche simili, può essere necessario ricorrere a tecniche diverse, come: metodi di colorazione selettiva dei minerali**,** cattoluminescenza ottica**,** diffrazione a raggi X (XRD)**,** microscopia elettronica a scansione con microanalisi EDS o microsonda WDS**.**
Al termine delle due fasi di osservazione è possibile assegnare alla roccia esaminata una classe petrografica, o almeno la famiglia litologica; se così non fosse, si ricorrerebbe all'esecuzione di ulteriori prove, come un'analisi chimica, minerochimica e fisica (i cui metodi non vengono descritti nella norma 12407).
Una descrizione petrografica risulta, dunque, fondamentale sia per classificare che per evidenziare le caratteristiche che determinano il comportamento chimico, fisico e meccanico del materiale esaminato, sotto certe condizioni ambientali e in opera.
Inoltre, permette di determinare l'origine delle pietre osservate, aspetto che può risultare utile, ad esempio, nel contesto di restauro di opere storiche.

Determinazione della velocità di propagazione del suono

La procedura per la misura della velocità di propagazione di onde ultrasoniche longitudinali attraverso una pietra naturale, sia in laboratorio che in situ, viene descritta nella UNI EN 14579:2004, intitolata "Metodi di prova per pietre naturali – Determinazione della velocità di propagazione del suono". Le informazioni riportate di seguito fanno fedele riferimento alla UNI EN 14579:2004.

Secondo quanto suggerito dalla norma, è necessario selezionare da un lotto omogeneo almeno 6 provini prismatici (300 mm × 75 mm × 50 mm ± 2 mm) ottenuti tramite taglio a sega o levigatura.

Nel caso in cui la pietra originaria presentasse piani di anisotropia (es. stratificazione, foliatura), i provini devono avere l'asse longitudinale parallelo o perpendicolare a questi piani.

Prima di iniziare con la prova effettiva, la pietra deve essere essiccata alla temperatura di (70 ± 5)°C fino al raggiungimento della massa costante, ovvero quando la differenza tra due pesate effettuate a distanza di (24 ± 2) ore non supera lo 0,1% rispetto alla prima misurazione, come definito nella norma di riferimento.

Un trasduttore elettroacustico (trasmittente), posto a diretto contatto con la superficie del campione da esaminare, genera un impulso di onde ultrasonore longitudinali. Questo impulso attraversa il materiale e viene rilevato da un secondo trasduttore (ricevente), anch'esso a contatto con la superficie e posto ad una distanza nota rispetto al primo. Una volta arrivato al secondo trasduttore, l'impulso di vibrazioni ricevuto viene convertito in segnale elettrico, il quale, grazie ad un dispositivo elettronico di temporizzazione, viene tradotto nel tempo di transito, tempo che intercorre tra l'emissione dell'impulso e il suo arrivo al trasduttore ricevente.

Il dispositivo elettronico di temporizzazione può essere un oscilloscopio, sul quale è possibile visualizzare il fronte iniziale dell'impulso e la forma d'onda, utile in situazioni più complesse, oppure un semplice timer digitale con visualizzazione diretta del tempo.

Nota la distanza (mm) tra i trasduttori e misurato il tempo (μs) impiegato dall'impulso nel percorrerla, risulta facile ricavare la velocità di propagazione dell'impulso ultrasonoro all'interno del materiale (km/s).

È fondamentale, inoltre, stabilire la frequenza delle onde sonore trasmesse, poiché influisce direttamente sulla qualità del segnale e sulla profondità di penetrazione dell'impulso. Solitamente la frequenza dei trasduttori è compresa tra 20 kHz e 150 kHz. In particolari condizioni operative, possono essere impiegate anche frequenze più basse (fino a 10 kHz) o più elevate (fino a 200 kHz).

Gli impulsi ad alta frequenza presentano un fronte iniziale più netto e facilmente identificabile, ma subiscono una maggiore attenuazione durante il passaggio attraverso la pietra naturale. Per questo motivo, è consigliabile utilizzare trasduttori ad alta frequenza (82–200 kHz) quando si effettuano misurazioni su percorsi brevi (fino a 50 mm), mentre per distanze maggiori (fino a 15 m) si preferiscono trasduttori a bassa frequenza (10–40

kHz). Le frequenze intermedie (40–82 kHz) risultano adatte alla maggior parte delle applicazioni pratiche.

Nel caso specifico di questa sperimentazione, è stata adottata una frequenza operativa pari a 54 kHz e a 33kHz, ritenuta idonea in relazione alle dimensioni dei campioni e alla natura del materiale.

Altrettando importante per la corretta trasmissione dell'impulso ultrasonoro, risulta l'accoppiamento acustico tra trasduttori e superficie lapidea. Nel caso di superfici lisce e regolari, l'accoppiamento risulta semplice e facilitato dall'utilizzo di prodotti come vaselina, grasso o sapone. Nel caso di superfici molto ruvide e irregolari, invece, nella norma si consiglia di ricorrere ad azioni di levigatura o molatura o in alternativa può essere applicata una resina epossidica a presa rapida, in grado di colmare le irregolarità e migliorare il contatto. Qualora la superficie presentasse rugosità marcate, tali da rendere inefficaci anche questi ultimi interventi, si può ricorrere all'utilizzo di trasduttori speciali, come è avvenuto in questo caso studio. Dopo aver pulito ed essiccato i campioni, la misura è stata fatta direttamente tramite trasduttori con testine coniche da 33 kHz sulle loro superfici naturali, caratterizzate da un'elevata rugosità e irregolarità, come è possibile osservare dalle foto ad inizio capitolo.

Molteplici sono i fattori che devono essere considerati al fine di ottenere risultati rappresentativi e attendibili, poiché capaci di influenzare la misurazione della velocità di propagazione degli ultrasuoni nella pietra naturale.

Uno di questi, il più rilevante, è il contenuto d'acqua: la presenza di umidità può infatti determinare variazioni del 50% rispetto al valore misurato su provini a secco. Non sorprende che i risultati ottenuti in laboratorio su provini sottoposti a essicazione, possano differire in maniera significativa da quelli ottenuti direttamente in situ su elementi edilizi e sotto certe condizioni ambientali. Per questo motivo, la norma suggerisce di considerare il contenuto anche mediante l'ausilio di curve specifiche di calibrazione.

Un altro aspetto fondamentale riguarda la lunghezza del percorso di trasmissione, che dovrebbe essere sufficientemente lunga da ridurre l'influenza dell'eterogeneità della pietra. La lunghezza minima del percorso viene stabilita in base velocità di propagazione dell'impulso e alla frequenza operativa dei trasduttori, come indicato nella tabella seguente, estratta dalla normativa.

Tabella 6-Influenza delle dimensioni del provino sulla trasmissione degli impulsi EN 14579:2004

Frequency of the transducer	Sound speed propagation (longitudinal) across the stone (in km/s)		
	3,50	4,00	4,50
	Smallest admissible lateral dimensions of the test specimen		
KHz	mm	mm	mm
24	146	167	188
54	65	74	83
82	43	49	55
150	23	27	30

In linea generale, la velocità di propagazione non dovrebbe variare a seconda della lunghezza del percorso, tuttavia alcuni dispositivi di temporizzazione segnalano una lieve riduzione della velocità al crescere della distanza; ciò è attribuibile al fatto che le componenti ad alta frequenza, come precedentemente anticipato, nonostante il fronte iniziale più netto e facilmente identificabile, si attenuano più rapidamente rispetto a quelle a bassa frequenza, comportando un'alterazione nella forma dell'impulso ricevuto, che tende ad arrotondarsi sempre di più con l'aumentare della distanza percorsa.

La velocità degli impulsi ultrasonori non dipende dalla forma o dalle dimensioni del provino ma dalla dimensione laterale minima, che deve essere maggiore di un certo valore: se troppo piccola, in particolare se la lunghezza d'onda fosse confrontabile con le sue dimensioni (del campione), la velocità potrebbe essere sottostimata. Tuttavia, se il rapporto tra lunghezza d'onda e dimensione laterale è inferiore a uno, l'errore è trascurabile. Nella stessa Tabella 6 sono presentati i valori guida sulle dimensioni minime necessarie per avere misurazioni efficaci. Nel caso in cui la dimensione laterale minima del campione è inferiore alla lunghezza d'onda, si ricorre alla trasmissione indiretta, che sarà spiegata di seguito. Questo aspetto risulta particolarmente rilevante, nel momento in cui debbano essere confrontati campioni lapidei con dimensioni molto differenti, poiché, altrimenti le misure potrebbero non essere direttamente confrontabili.

Quando gli ultrasuoni incontrano fessure piene d'aria o vuoti, l'onda non riesce a proseguire in linea retta. Se il difetto è grande rispetto alla lunghezza d'onda e alla dimensione del fascio, l'impulso viene bloccato, e si diffrange ai bordi, impiegando più tempo per arrivare al ricevitore. Questo ritardo nel tempo di percorrenza è dunque indicativo della presenza di discontinuità interne e risulta utile per valutare l'integrità strutturale della pietra.

Tuttavia, se una pietra presenta fessure ma i lati fratturati sono ben accostati, ad esempio per effetto di compressione (come in colonne verticali), l'impulso ultrasonoro può attraversare senza interferenze evidenti.

Lo stesso può accadere se le fessure sono riempite con un liquido conduttore (es. acqua di mare): in questi casi, la presenza della frattura potrebbe non essere rilevata da una semplice misurazione del tempo di transito, perciò, potrebbe risultare più efficace misurare l'attenuazione dell'impulso osservabile tramite oscilloscopio.

A seconda di come i due trasduttori vengono rispettivamente posizionati sulla superficie del campione, la trasmissione dell'impulso può essere diretta, semi-diretta o indiretta/superficiale.

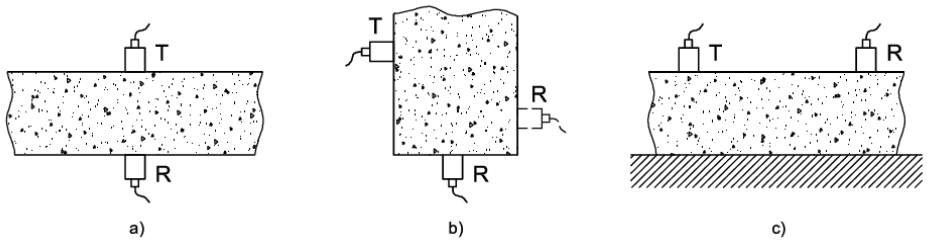


Figura 132- T = trasmettitore; R = ricevitore, EN 14579:2004

La trasmissione è diretta quando i due trasduttori sono posizionati su facce opposte come è possibile vedere nella Figura 132 presa direttamente dalla norma di riferimento. In questo caso, l'energia di propagazione dell'impulso è massima poiché perpendicolare alla faccia del trasduttore trasmittente, e la lunghezza del percorso da considerare è semplicemente la distanza tra i trasduttori.

La trasmissione è semi-diretta quando i due trasduttori sono posizionati su facce adiacenti o, laddove necessario, su facce opposte ma non allineati; in questo caso la lunghezza del percorso è data dalla distanza tra i centri delle superfici di contatto dei trasduttori e la precisione della misura dipende dalla dimensione dei trasduttori rispetto alla distanza misurata. Tale configurazione dovrebbe essere adottata nei casi in cui la trasmissione diretta non sia tecnicamente realizzabile; la sua capacità di rilevamento è intermedia tra le due configurazioni

Infine, la trasmissione viene definita indiretta o superficiale, quando i trasduttori sono posizionati sulla stessa faccia. Tra le tre, risulta quella con la minore capacità di rilevamento dell'impulso. Solitamente si ricorre a tale modalità nelle prove in situ, quando è accessibile solo una superficie della pietra o quando si predilige lo studio dello strato superficiale piuttosto che dell'intero corpo del materiale lapideo. In questo caso la lunghezza del percorso di trasmissione non è misurabile direttamente e risulta incerta a causa delle significative aree di contatto dei trasduttori con la superficie della pietra campione.

Nel caso di trasmissione indiretta, viene eseguita una serie di misurazioni posizionando il trasduttore trasmittente a contatto con la superficie in un punto fisso, e spostando il trasduttore ricevente in diversi punti allineati secondo predeterminate distanze.
Per facilitare l'operazione, è stato impiegato un righello con fori equidistanti (ogni 4 cm) e allineati che consente l'inserimento del trasduttore ricevente a distanze regolari da un punto all'altro. Questo strumento, realizzato manualmente, osservabile nelle figure 133 e 134 sottostanti, è stato particolarmente utile durante le misurazioni in situ, dove le condizioni operative risultano spesso meno agevoli.

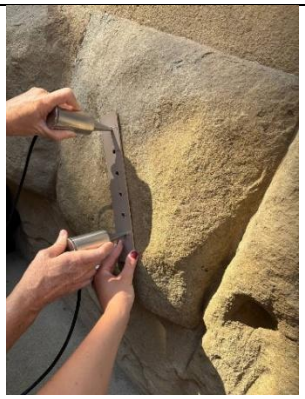


Figura 133-Misurazioni in trasmissione indiretta in situ

Figura 134-Misurazioni in trasmissione indiretta in situ

Nell'immagine seguente, tratta dalla norma EN 14579, a sinistra è illustrata la modalità operativa per l'esecuzione delle misurazioni in trasmissione indiretta, come precedentemente descritto. A destra è riportato un grafico esemplificativo che mostra come rappresentare i tempi di trasmissione registrati in funzione della distanza tra i trasduttori. Data la correlazione tra tempo e distanza, la pendenza della retta che meglio interpoli i punti sperimentali rappresenta la velocità media dell'impulso ultrasonoro attraverso il materiale lapideo lungo lo stendimento/allineamento scelto. Eventuali deviazioni anomale rispetto all'andamento lineare atteso, possono indicare la presenza di discontinuità interne come una fessura o uno strato superficiale di qualità inferiore. In tal caso, la misurazione potrebbe risultare non rappresentativa, dunque non attendibile delle reali proprietà del materiale.

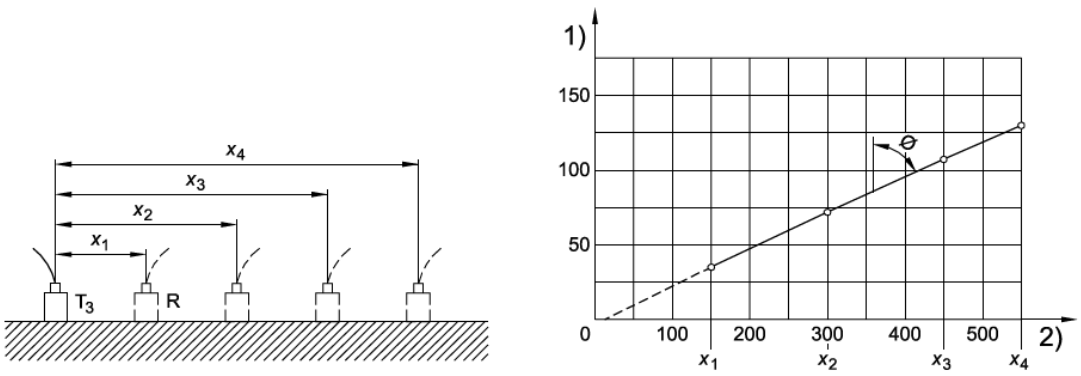


Figura 135- Determinazione della velocità dell'impulso mediante trasmissione indiretta (superficiale) (EN 14579:2004)

Determinazione dell'assorbimento d'acqua a pressione atmosferica

La norma europea EN 13755:2008, intitolata *"*Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione dell'assorbimento d'acqua a pressione atmosferica*"*, descrive un metodo per valutare la capacità della pietra naturale di assorbire l'acqua mediante immersione in condizioni di pressione atmosferica. Di seguito verrà descritta la prova facendo riferimento alla EN 13755:2008.

Ai fini della prova, vengono selezionati almeno sei provini da un lotto omogeneo, aventi una forma cilindrica, cubica o prismatica con dimensioni pari a (70 ± 5) mm o (50 ± 5) mm, ottenuti tramite taglio con disco diamantato o carotaggio. Inoltre, il loro volume apparente, inteso come "volume delimitato dalla superficie esterna del provino, inclusi eventuali vuoti" secondo la definizione della norma EN 1936:2006, deve essere calcolato tramite misure geometriche e risultare pari ad almeno 60 ml; il rapporto tra superficie esterna e volume deve essere compreso tra 0,08 mm^{-1} e 0,20 mm^{-1}.

Per questa prova sono stati utilizzati i 7 provini, introdotti ad inizio capitolo, di forma cubica e lato di 50mm; nella tabella di seguito si riportano le grandezze calcolate che rispettano i valori richiesti.

Tabella 7

lato provino l (mm)	volume apparente V (mm^3)	superficie esterna A (mm^2)	rapporto superficie A/V (mm^{-1})
50	125000	15000	0.12

Prima di iniziare con la prova effettiva, tali provini vengono sottoposti ad un processo di essiccazione a temperatura (70 ± 5) °C fino al raggiungimento della massa costante, definita nel paragrafo precedente; dopodiché devono essere lasciati raffreddare in un essiccatore fino a raggiungere la temperatura ambiente (20 ± 5) °C, una volta raggiunta, devono essere pesati.

Successivamente devono essere sistemati in una vasca a base piatta su dei supporti, non ossidanti e non assorbenti, a una distanza reciproca di almeno 15 mm, secondo le indicazioni della normativa. Inizialmente vengono immersi nell'acqua alla temperatura di (20 ± 10) °C fino a metà della loro altezza (tempo t0). Un'ora dopo circa, deve essere aggiunta ulteriore acqua fino ai tre quarti della loro altezza e dopo un'ulteriore ora (quindi al tempo t0 + (120 ± 5) minuti) devono essere completamente immersi (con circa (25 ± 5) mm, in termini di colonna d'acqua soprastante).

Dopo (48 ± 2) ore, devono essere estratti dall'acqua, asciugati rapidamente con un panno umido e pesati entro 1 minuto.

I provini vengono poi, nuovamente immersi in acqua ed estratti (24 ± 2) ore dopo, per eseguire la stessa procedura: estratti dall'acqua, asciugati rapidamente con un panno umido e pesati entro 1 minuto fino a che non viene raggiunto un valore costante della massa misurata. Il risultato dell'ultima pesata rappresenta la massa del provino saturo.

L'assorbimento dell'acqua a pressione atmosferica viene espresso in percentuale e calcolato come rapporto tra la massa del provino saturo (ottenuta a massa costante) e la massa del provino secco.

Determinazione della resistenza alla cristallizzazione dei Sali

La norma UNI EN 12370:2020, intitolata "Metodi di prova per pietre naturali – Determinazione della resistenza alla cristallizzazione dei Sali", descrive un metodo di prova, come indicato dal titolo, per valutare la resistenza alla cristallizzazione dei sali delle pietre naturali, laddove necessario e rilevante; in particolare è consigliato eseguire il test su pietre con porosità aperta superiore al 5% (misurata secondo la EN 1936, "Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione delle masse volumiche reale e apparente e della porosità totale e aperta") mentre risulta non necessario per pietre a bassa porosità. Di seguito verrà descritta la prova facendo riferimento alla EN 12370:2020.

I risultati di tale test, affinché risultino significativi, dovrebbero essere considerati insieme a quelli ottenuti tramite prove utili per la definizione della durabilità e della resistenza del materiale, come ad esempio la prova descritta nella norma EN 12371, "Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della resistenza al gelo".

Per l'esecuzione della prova devono essere selezionati almeno sei provini rappresentativi, tagliati poi con sega diamantata a umido, in forma cubica con lato (40 ± 1) mm.

Prima di iniziare la prova effettiva, i provini devono essere lavati con acqua corrente per rimuovere tutto il materiale friabile dalla superficie, dopodiché si procede con l'essiccazione in forno a (105 ± 5) °C fino al raggiungimento della massa costante, già definita. Una volta raffreddati a temperatura ambiente, vengono pesati a secco.

Ogni provino deve essere etichettato: essendo la prova distruttiva, è necessario che ciascuno sia riconoscibile ed identificabile in ogni momento, la norma suggerisce l'utilizzo di una targhetta resistente fissata al cubo con un filo.

Ogni provino essiccato dovrebbe essere posto in un contenitore e poi immerso in una soluzione acquosa di solfato di sodio decaidrato al 14% a una profondità di (8 ± 2) mm sopra la superficie del provino per un tempo di 2 ore a (20 ± 0,5) °C; durante questo tempo il contenitore viene coperto per ridurre l'eventuale evaporazione dell'acqua. In alternativa, i provini possono essere posizionati insieme in un unico contenitore, distanziati di almeno 10 mm tra di loro e di almeno 20 mm dei lati del contenitore. La norma suggerisce di porre attenzione alle variazioni di temperatura poiché potrebbero influenzare significativamente i risultati.

Dopo l'immersione, i provini vengono rimossi dalla soluzione ed essiccati in forno per almeno 16 ore a temperatura (105 ± 5) °C. Come richiesto da normativa, poiché il forno deve mantenere un'umidità relativa elevata (90%) nelle prime fasi di essiccazione, si inserisce nel forno acceso, circa (30 ± 5) minuti prima di inserire i provini, una vaschetta piena d'acqua (la norma suggerisce un volume d'acqua di (2,5 ± 0,5) ml per ogni litro di volume del forno).

Una volta estratti dal forno, sono poi raffreddati a temperatura ambiente per (2,0 ± 0,5) ore prima di essere nuovamente immersi nella soluzione di solfato di sodio. Questo ciclo viene ripetuto 15 volte, a meno che non avvenga prima la rottura dei provini, a quel punto, per il/i provino/i fratturato/i la prova si interrompe.

Al termine del quindicesimo ciclo, una volta rimossi dal forno, i campioni devono essere conservati per (24 ± 1) ore in acqua a (23 ± 5) °C; infine, devono essere lavati con acqua

corrente e dopo essiccazione, devono essere pesati a massa costante se risultano sufficientemente integri.

Al termine della prova, viene misurata la variazione percentuale della massa tra il peso iniziale e finale dei provini a secco.

3. Risultati

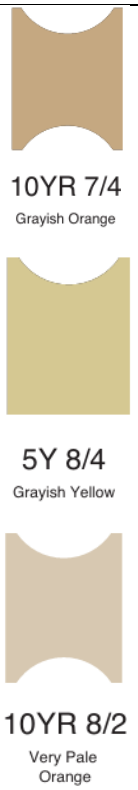
Esame petrografico

Di seguito si riportano, seguendo le indicazioni della EN 12407:2019, i risultati e le osservazioni della descrizione macroscopica in analisi petrografica:

a) Colore: sono riportate le immagini dei campioni #1 e #3 con a fianco i colori, che più si avvicinano, presi dalla *Rock Colour Chart,* come suggerito da normativa*:*

Figura 136-Campione #1 (grana fine)

Figura 137-Campione #3 (grana "grossa")



Il colore comune ad entrambi i campioni è quello identificato nella *Rock Colour Chart dal codice 5Y 8/4- Grayish Yellow.*

Di seguito si riporta una fotografia del campione #2, il quale si caratterizza per una variazione cromatica molto particolare e intensa. Non è stato ritenuto idoneo come campione rappresentativo del colore della Pietra Bigia, nonostante ciò, tale colorazione bruno-rossastra è molto frequente ed è dovuta, si presume, alla presenza e all'ossidazione dei minerali ferrosi (come ematite), derivanti dall'alterazione dei feldspati tipici della roccia.

Figura 138-Campione #2

b) Struttura della roccia (giunti, stratificazione, stiloliti, ecc.): tipica stratificazione delle rocce sedimentarie.

c) Granulometria**:**
   per i campioni #1, #2 e #4: fine-finissima
   per i campioni #3 #, #5, #6, #7 e #8: media-fine

d) Fratture macroscopiche aperte e riempite, pori e cavità (se rilevanti): non presenti.

e) Evidenze di alterazione e degrado: come già anticipato, nei campioni prelevati sono presenti macchie di colore bruno-rossastro, in corrispondenza delle quali, tramite l'uso di martello e scalpello, è avvenuta la rottura in fase di "prelievo" dal masso di roccia originario. La superficie di rottura, in corrispondenza di tale variazione cromatica, è risultata liscia e planare; anche nella prova di cristallizzazione dei Sali, in alcuni casi, la rottura è avvenuta in corrispondenza della medesima alterazione. Dunque, questa particolarità cromatica, dovuta principalmente all'ossidazione degli elementi ferrosi, può essere considerata un punto di debolezza strutturale della roccia.

Figura 139	*Figura 140*	*Figura 141*

Inoltre, la superficie esterna dei campioni, che nel tempo è rimasta esposta, oltre ad una colorazione verdastra, verosimilmente attribuibile alla colonizzazione da parte di muschi o di altri organismi vegetali, favoriti da condizioni ambientali umide e ombreggiate, tipiche in una zona di bosco in collina come la zona di Monte Ceceri in cui sono stati prelevati, ospitava veri e proprio elementi vegetali come è possibile osservare in figura.

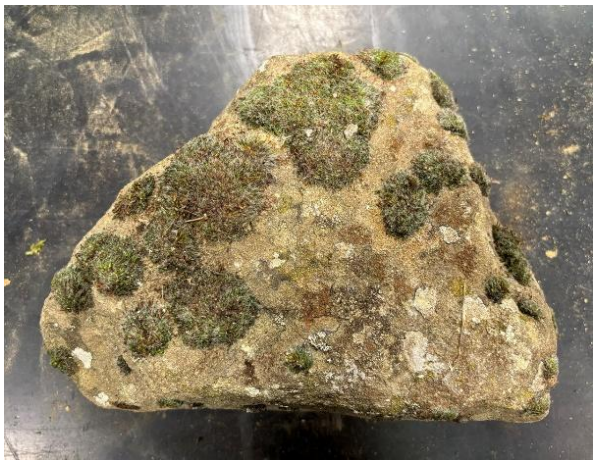


Figura 142- Campione #3

f) Presenza di macrofossili (se rilevante): non presenti.

Di seguito le considerazioni derivanti dall'analisi microscopica delle sezioni sottili ricavate dal campione #2 e #3:

Campione #2: arenaria a grana fine uniforme con dimensioni variabili da 0.04 a 0.2mm, tessitura vagamente anisotropa evidenziata dalla disposizione subparallele di lamelle di mica e dall'isorientazione dei grani allungati. La colorazione di fondo è marroncina alla scala del campione a mano, mentre in sezione sottile si nota abbondante presenza di ematite e di aloni ferruginosi negli spazi intergranulari a causa dell'alterazione degli ossidi di Fe. I grani sono tendenzialmente spigolosi e sono costituiti da quarzo per l'80%,

miche per il 5%, feldspati per il 10%, ematite e frammenti litoidi per il 5%. La scarsa matrice (5-10%) è costituita da cemento fillosilicatico/argilloso.

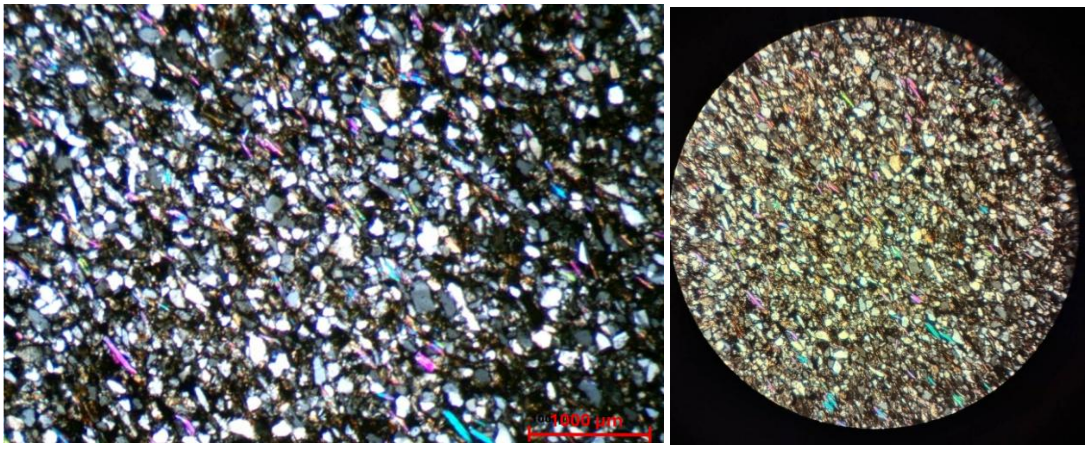


Figura 143- Campione #2 vista al microscopio polarizzatore a luce incrociata (risoluzione a 1000 µm)

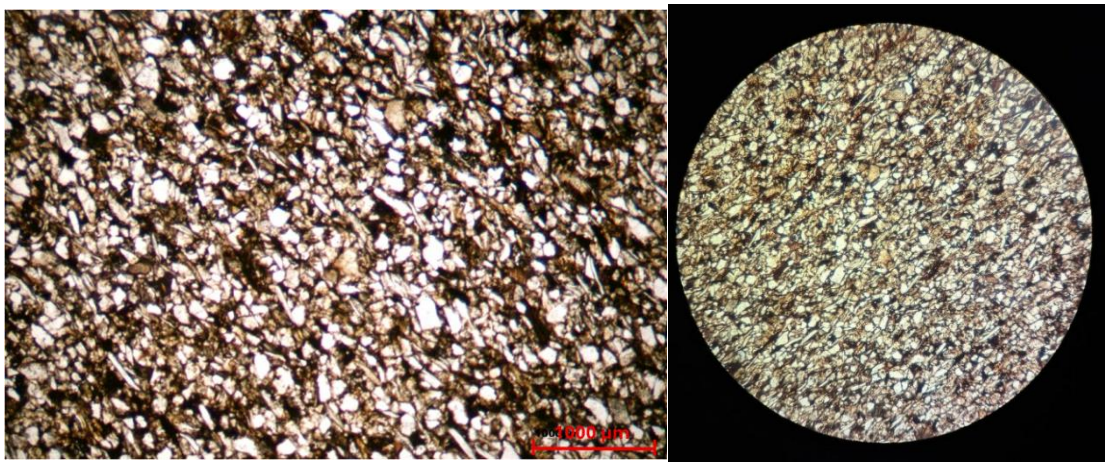


Figura 144- Campione #2 vista al microscopio polarizzatore a luce parallela (risoluzione a 1000 µm)

Campione #3: arenaria a grana media non selezionata con dimensioni variabili da 0.2 a 1.2 mm. La colorazione di fondo è marroncina alla scala del campione a mano, mentre in sezione sottile si nota presenza di ematite e di aloni ferruginosi negli spazi intergranulari a causa dell'alterazione degli ossidi di Fe. I grani sono tendenzialmente spigolosi e sono costituiti da quarzo per il 75%, miche e clorite per il 5%, feldspati per il 10%, ematite e frammenti litoidi per il 10%. La scarsa matrice (5-10%) è costituita da cemento fillosilicatico/argilloso.

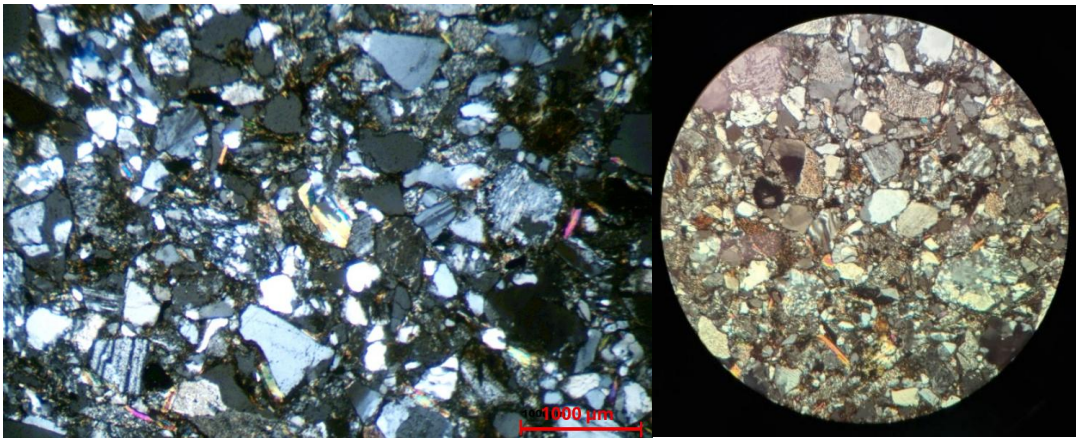


Figura 145- Campione #3 vista al microscopio polarizzatore a luce incrociata (risoluzione a 1000 µm)

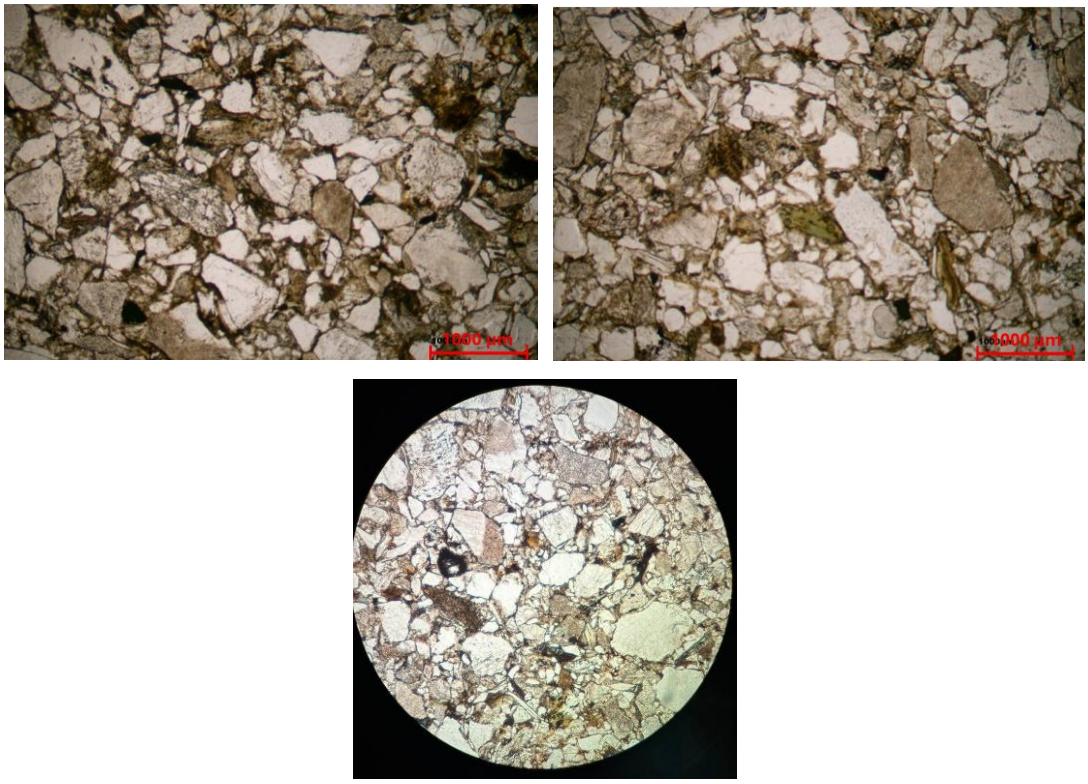


Figura 146- Campione #3 vista al microscopio polarizzatore a luce parallela (risoluzione a 1000 µm)

Di seguito una tabella riassuntiva di tutte le osservazioni, che secondo le indicazioni della normativa, devono essere incluse nella descrizione microscopica dell'esame petrografico:

Tabella 8

	Campione #2	**Campione #3**
Tessitura (Fabric): *Orientamento relativo delle parti di una massa rocciosa; si distingue quindi in megafabric,*	Vagamente **anisotropa** evidenziata dalla disposizione subparallele di lamelle di	-

mesofabric e microfabric a seconda della scala (EN 12670)	mica e dall'isorientazione dei grani allungati	
Minerali/Granuli		
Percentuale in volume (vol.%)	Quarzo per l'80%, miche per il 5%, feldspati per il 10%, ematite e frammenti litoidi per il 5%. (stima visiva)	Quarzo per il 75%, miche e clorite per il 5%, feldspati per il 10%, ematite e frammenti litoidi per il 10%. (stima visiva)
Dimensioni: valore medio e intervallo di variazione (se necessario, sia per la massa di fondo che per i cristalli o granuli di dimensioni maggiori).	Variabili da 0.04 a 0.2mm (fine)	Variabili da 0.2 a 1.2 mm (medio-fine)
Forma *(*es. isometrica, anisometrica, appiattita, allungata). I granuli detritici nelle rocce sedimentarie devono essere descritti in termini di sfericità e arrotondamento.	Grani tendenzialmente spigolosi	Grani tendenzialmente spigolosi
Distribuzione (es. omogenea, eterogenea, a strati, a macchie).	Uniforme	Non selezionata ?
Orientazione (es. isotropa, orientazione preferenziale di forma, orientazione preferenziale dimensionale, isorientamento di grani lamellari o tabulari, isorientamento di grani allungati o prismatici).	disposizione subparallele di lamelle di mica e dall'isorientazione dei grani allungati**** tessitura	-

La classificazione granulometrica di riferimento è stata presa quella definita nella normativa EN 12407:2019:

- Molto grossolani (>10 mm)
- Grossolani (4 mm – 10 mm)
- Medi (1 mm – 4 mm)
- Fini (<1 mm)

Massa di fondo		
Nelle rocce sedimentarie, devono essere distinte: • La matrice (pelitica microcristallina, carbonatica o silicica, che ingloba i granuli se presenti o riempie gli interstizi) • Il cemento (materiali amorfi o cristallini che riempiono parzialmente o completamente le cavità)	La scarsa matrice (5-10%) è costituita da cemento fillosilicatico/argilloso	La scarsa matrice (5-10%) è costituita da cemento fillosilicatico/argilloso.
Alterazioni		
Descrizione dei minerali alterati.		Alterazioni ferruginose (ematite negli spazi intergranulari).

Sulla base delle osservazioni ed i dati ottenuti, in particolare relativamente alla granulometria, tessitura e composizione mineralogica, è possibile assegnare un gruppo/famiglia litologica ai campioni esaminati. In entrambi i casi è possibile definire la Pietra Bigia come anch'essa un'arkose litica feldspatica contenente quarzo, feldspato, miche, clorite, ematite e frammenti litoidi a cemento fillosilicatico/argilloso.
A fine di tale analisi petrografica, un possibile nome commerciale della Pietra Bigia, in conformità alla norma EN 12440 potrebbe essere: Pietra Bigia (varietà della Pietra Serena), arkose litica, 5Y 8/4 (Grayish Yellow) giallo grigiastro, Monte Ceceri (Fiesole), Toscana, Italia.

Determinazione della velocità di propagazione del suono

Seguendo le indicazioni della UNI EN 14579:2004, la velocità dell'impulso in caso di trasmissione diretta viene calcolata con l'elementare e ben nota formula:

$$V = \frac{L}{T}$$

dove:

$[V] = \frac{km}{s}$, V è la velocità dell'impulso;

$[L] = mm, L$ è la lunghezza del percorso;

$[T] = \mu m, T$ è il tempo impiegato dall'impulso per percorrere la lunghezza, in μs.

Di seguito sono riportate le foto dei campioni su cui è stata condotta la prova in laboratorio e le tabelle con i risultati ottenuti per ciascuno di essi.

Prima di acquisire le misurazioni, i campioni sono stati lavati accuratamente sotto acqua corrente ed è stata eliminata per quanto possibile, tramite rimozione diretta (staccamento) e sfregamento con spatola, la componente vegetale sviluppatesi nel tempo sulla superficie della roccia esposta poiché potrebbe essere motivo di disturbo durante la prova. Dopodiché sono stati essiccati in forno ad una temperatura di circa 70 °C.

L'acquisizione delle misure in laboratorio non è stata semplice ed è stato necessario ripeterla più volte a causa delle superfici irregolari dei campioni che, non solo non facilitano il contatto tra i trasduttori e la superficie della pietra ma non consentono la misura precisa della distanza tra i trasduttori stessi che coincide con la lunghezza del percorso di trasmissione dell'impulso. Ulteriore motivo di disturbo, è attribuibile alla parziale presenza di resti vegetali/biologici sulla superficie, rimasti in parte nonostante il lavoro meccanico fatto per rimuoverli. Per questo motivo sono stati adottati dei trasduttori con testine coniche da 33 kHz più idonei in questo contesto e per facilitare l'accoppiamento tra superficie e trasduttori è stato usato un gel acquoso di accoppiamento, reversibile e innocuo, sulla pietra presente in laboratorio.

La disposizione dei trasduttori e il metodo di trasmissione, l'orientamento della direzione di propagazione dell'impulso rispetto ai piani di anisotropia, i valori misurati della lunghezza del percorso, dei tempi di transito e i valori calcolati della velocità dell'impulso lungo ciascun percorso sono stati riportati di seguito per ciascun campione.

Campione #1

Di seguito, le fotografie del campione #1, sulle cui superfici sono visibili numeri, tracciati con pennarello nero, che identificano le diverse misurazioni della velocità di

propagazione dell'impulso ultrasonico effettuate in trasmissione diretta attraverso il materiale lapideo.

La tabella 9 riporta, per ciascuna acquisizione, la lunghezza del percorso, il tempo di transito e la velocità dell'impulso, calcolata a partire da queste due grandezze misurate.

In questo caso, le acquisizioni 1, 2, 3 e 4 sono state eseguite perpendicolarmente alla stratificazione, mentre la 5 è stata effettuata in parallelo.

Una difficoltà riscontrata è stata determinare con precisione la lunghezza dei percorsi, a causa della superficie estremamente irregolare del campione.

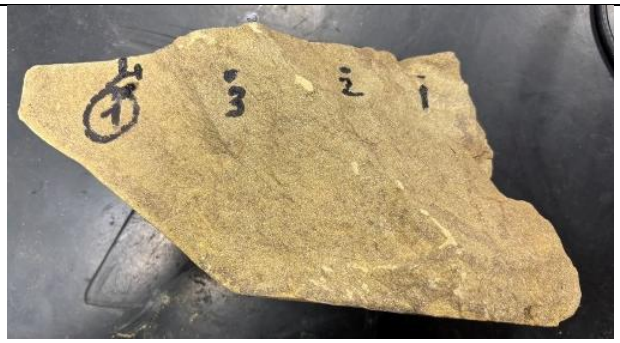


Figura 147

Figura 148

Figura 149

Tabella 9

CAMPIONE 1		#1 (perpendicolare alla stratificazione)	#2 (perpendicolare alla stratificazione)	#3 (perpendicolare alla stratificazione)	#4 (perpendicolare alla stratificazione)	#5 (alla stratificazione)
TRASMISSIONE DIRETTA	d (mm)	50.55	69.9	81.07	69.09	214
	t (µs)	35	41	57	90	99
	v (m/s)	1444.29	1704.88	1422.28	767.67	2161.62
	v(km/s)	1.44	1.70	1.42	0.77	2.16

Campione #2

Di seguito, le fotografie del campione #2, sulle cui superfici sono visibili diversi numeri, tracciati con pennarello nero, corrispondenti alle varie misurazioni acquisite della velocità di propagazione dell'impulso ultrasonico mediante trasduttori.

I valori ottenuti da ciascuna misurazione (identificata dal numero corrispettivo) sono riportati in tabella x. Nel caso delle misurazioni in trasmissione diretta, si riportano le lunghezze dei percorsi di trasmissione, i corrispettivi tempi di percorrenza e le velocità conseguenti. Le acquisizioni 1, 2 e 6 in trasmissione diretta sono state effettuate perpendicolarmente alla stratificazione, mentre la 3 è stata eseguita parallelamente alla stratificazione.

Nell'immagine 153, le frecce rosse e quella bianca indicano le lunghezze dei percorsi di trasmissione dell'impulso, corrispondenti alla distanza tra i punti di posizionamento dei trasduttori durante le misurazioni.

Nell'immagine 151, invece, sono visibili gli stendimenti 4 e 5, relativi alle misure effettuate in trasmissione indiretta.

In particolare, la misura 4 è stata eseguita in corrispondenza di una netta macchia di colore differente (tendente al grigio) rispetto al resto della superficie lapidea.

Figura 150

Figura 151

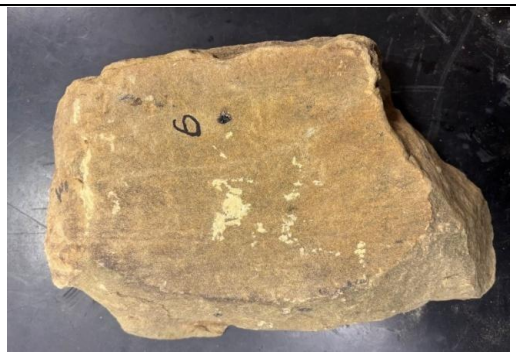


Figura 152-

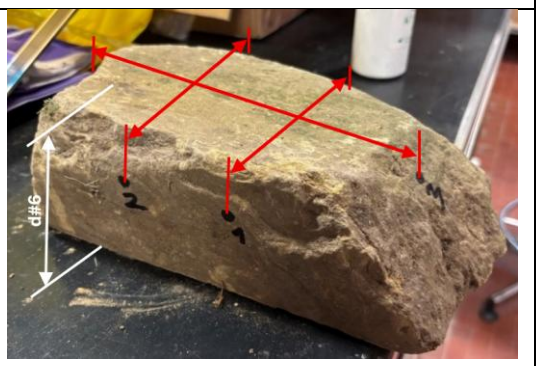


Figura 153

Tabella 10

CAMPIONE 2		#1 (perpendicolare alla stratificazione)	#2 (perpendicolare alla stratificazione)	#3 (parallelo alla straificazione)	#6 (alla stratificazione)
TRASMISISONE DIRETTA	d(mm)	151	151	215	85.67
	t (µs)	109	107	75	33
	v (m/s)	1385.32	1411.21	2866.67	2596.06
	v(km/s)	1.39	1.41	2.87	2.60
		stendimento 4	stendimento 5		
TRASMISSIONE INDIRETTA	v (m/s)	1810	2020		
	v(km/s)	1.81	2.02		

Campione #3

Del campione, non viene riportata nessuna documentazione fotografica. In tabella sono riportati i valori ottenuti dall'acquisizione in trasmissione diretta e indiretta.

Tabella 11

CAMPIONE 3		#1	#2
	d (mm)	153.63	235
TRASMISSIONE DIRETTA	t (µs)	65	93
	v (m/s)	2363.54	2526.88
	v(km/s)	2.36	2.53
TRASMISSIONE INDIRETTA		stendimento 3	
	v (m/s)	1581	

Campione #4

Di seguito foto esemplificativa, dell'acquisizione della misura in trasmissione diretta, il cui valore è riportato in tabella.

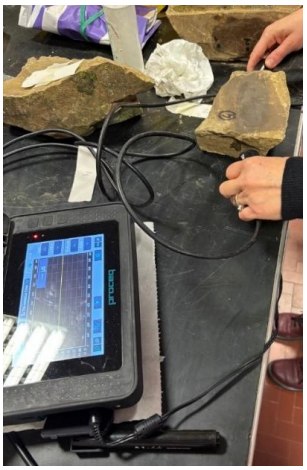


Figura 154

Tabella 12

CAMPIONE 4		d (mm)	t (µs)	v (m/s)	v(km/s)
		114	39	2923.08	2.92

Secondo le misurazioni acquisite sui campioni, la velocità in trasmissione diretta è compresa tra 767.67 e 2923.08 m/s e in trasmissione indiretta tra 1581e 2020 m/s, con una velocità media pari 1803.67 m/s. Il range di velocità ottenuto è piuttosto ampio e variabile da un campione ad un altro.

Tabella 13

velocità superficiale media sui campioni (m/s):	1803.67

Nella tabella 14 di seguito, sono riassunti i dati acquisiti durante le prove in situ, sia nella cava storica sul Monte Ceceri in data 17 giugno 2025 che nel centro storico fiorentino in data 18 giugno 2025. In particolare, sono riportati: la velocità di propagazione dell'impulso ultrasonoro in trasmissione indiretta, l'intervallo della temperatura e la temperatura media acquisita tramite termocamera dei materiali lapidei e le temperature medie rilevate a Firenze nei giorni sopra citati.

Per quanto riguarda l'intervallo della temperatura acquisita tramite termocamera, il valore superiore, in alcuni casi è stato scelto secondo una valutazione soggettiva e personale, inferiore rispetto a quello indicato nello schermo: in alcune foto vi sono elementi estranei al materiale lapideo, tra cui gli operatori stessi che hanno condotto la prova e che risultano a temperatura evidentemente più alta. Perciò, tramite l'associazione del colore in scala con la temperatura (a destra dell'immagine acquisita in termocamera) è stata approssimato un valore massimo plausibile.

Tabella 14

misure in situ		Surface Velocity-trasmissione indiretta		Range temperatura da termocamera	temperatura media	temperatura media Firenze	
		v (m/s)		T (°C)	Tm (°C)	Tf (°C)	
Monte Ceceri	#1	1896	PS	18.7-22.8	20.75	22.5	17 Giugno 2025
	#2	2198	PB	18.6-21	19.8		
	#3	1896	PS	23.5-27.6	25.55	*piogge in nottata e al mattino*	
	#4	1852	PS	24.1-28	26.05		
	#5	1786	PB	26.1-36	31.05		
Palazzo Zuccari	#1	2062	PB	27.6-31	29.3	26.5	18 Giugno 2025
	#2	2516	PB	26.8-30	28.4		
Palazzo Budini Gattai	#1	2198	PB	33.7-55	44.35		
	#2	2083	PB	33.6-57	45.3		
Chiesa di Sant'Agata	#1	2439	PB	25.3-29.4	27.35		
	#2	1639	PB				
Basilica San Marco	#1	2469	PF	29-33.1	31.05		
Palazzo Giaconi	#1	2083	PB	30.7-35	32.85		
Palazzo Orlandini Del Beccuto	#1	2062	PB	32.9-46.4	39.65		
	#2	2162	PF				
PB= Pietra Bigia		velocità media PB		1915.09 m/s			
PS= Pietra Serena							
PF= Pietra Forte							

Tabella 15- Valori minimi e massimi della temperatura registrati a Firenze: la prima colonna si riferisce al 17 giugno 2025, la seconda al 18 giugno 2025. (Fonte dati: Lamma Toscana. (2025, 17 giugno) (2025,18 giugno)).

		Firenze	Firenze
T. min	osservata	19	20
	anomalia*	4	4
T. max	osservata	26	33
	anomalia*	-2	5
Precipitazione (mm/24ore)		2	0

*anomalia calcolata sulla base della normale climatica decadale 1981-2010

In Appendice B documentazione fotografica per ciascuna misurazione, sia della velocità degli ultrasuoni che delle immagini termografiche.

In questo caso, considerando tutti gli elementi in Pietra Bigia, sia in cava che quelli sugli edifici, la velocità media di propagazione risulta pari a 1915.09 m/s e i valori minimi e massimi misurati sono 1639 e 2516 m/s. I risultati ottenuti in situ risultano altrettanto variabili rispetto a quelli ottenuti sui campioni in laboratorio, in questi ultimi il valore medio è minore di circa 100 m/s, discostamento plausibile, visti i maggiori fattori di disturbo che possono incontrarsi nelle prove sul campo, piuttosto che in laboratorio. Per gli elementi in Pietra Serena, le pareti rocciose nella cava storica di Monte Ceceri, il range delle velocità è compreso tra 1852 a 1896 m/s: l'intervallo è molto più ristretto ma il valore medio della velocità (1874 m/s) è simile al valore medio riscontrato nella Pietra Bigia, con una differenza di circa 50 m/s. Tra le varie misurazioni, sono stati misurati anche un paio di elementi in Pietra Forte, sulla Basilica di San Marco e sul Palazzo Orlandini del Beccuto: i valori della velocità misurate sono rispettivamente 2469 e 2162 m/s, il valore medio delle due acquisizioni è pari 2315,5m/s, valore più elevato rispetto alle altre due Pietre del Macigno, ciò andrebbe a confermare una densità e un grado di compattezza più alti nella Pietra Forte.

Per quanto riguarda le temperature misurate di seguito si riporta un grafico esemplificativo:

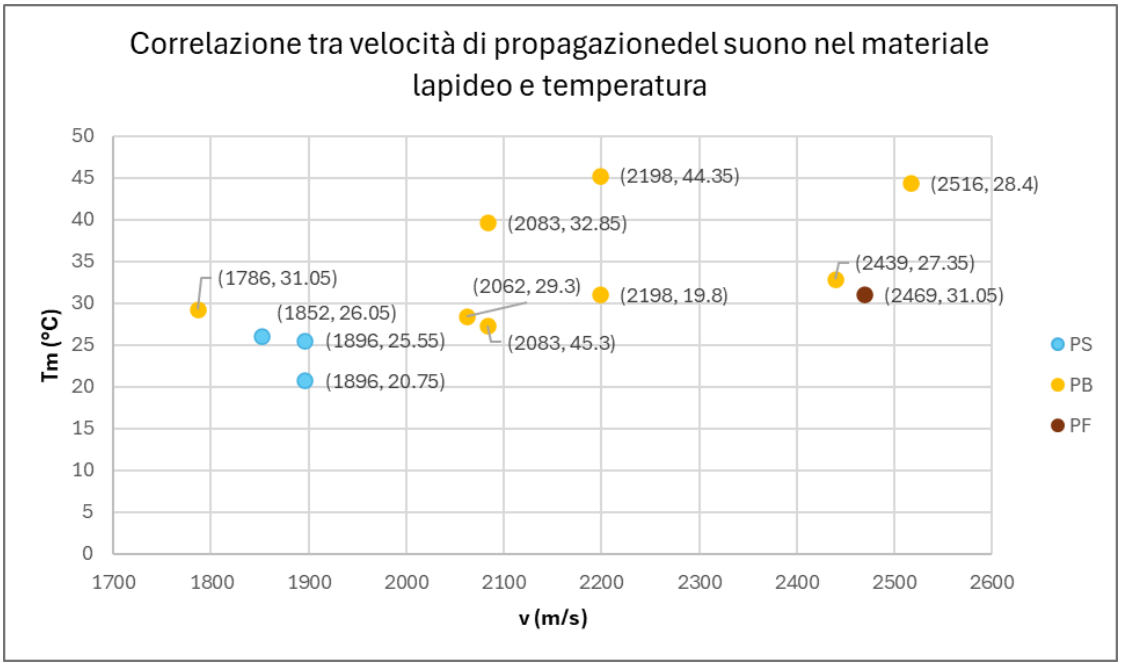


Figura 155 PS=Pietra Serena, PB=Pietra Bigia, PF=Pietra Forte

Non sembra esserci una particolare correlazione tra le velocità le temperature acquisite.

Determinazione dell'assorbimento d'acqua a pressione atmosferica

I risultati conseguiti dalla prova condotti sui 7 provini sono riportati in tabella.

Tabella 16

#PROVINO	ms (g)	md (g)	CA
1_2	347.05	337.96	2.69%
2_2	337.08	325.71	3.49%
3_2	324.97	313.21	3.75%
4_2	330.69	318.88	3.70%
5_3	341.66	331.8	2.97%
6_3	328.51	319.22	2.91%
7_3	330.6	321.19	2.93%

Significato dei simboli presenti:

ms massa del provino saturo (dopo immersione in acqua fino al raggiungimento della massa costante) in aria, in grammi;

md massa dei provini a secco, espressa in grammi;

CA è il coefficiente di assorbimento espresso in percentuale, calcolato per ciascun provino tramite la seguente formula:

$$CA = \left(\frac{m_s - m_d}{m_d}\right) 100$$

Determinazione della resistenza alla cristallizzazione dei Sali

Nella tabella sono riportati alcuni valori già presentati nel paragrafo precedente, con l'aggiunta di m_h, ovvero la massa dei provini idrostatica (immersi in acqua), espressa in grammi, ottenuta pesando i provini in acqua. Inoltre, è stata calcolata Po per ciascun provino, ovvero la porosità aperta, espressa in percentuale e definita secondo la EN 1936, "Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione delle masse volumiche reale e apparente e della porosità totale e aperta" come "rapporto (espresso in percentuale) tra il volume dei pori aperti e il volume apparente del campione" misurata secondo la seguente formula:

$$Po = \left(\frac{m_s - m_d}{m_s - m_h}\right) 100$$

Tabella 17

#PROVINO	mh (g)	ms (g)	md (g)	Po
1_2	209.33	347.05	337.96	7.07%
2_2	197.74	337.08	325.71	8.88%
3_2	189.37	324.97	313.21	9.50%
4_2	192.03	330.69	318.88	9.31%
5_3	203.5	341.66	331.8	7.69%
6_3	195.36	328.51	319.22	7.50%
7_3	196.74	330.6	321.19	7.56%

Il valore della porosità è stato calcolato per giustificare l'esecuzione della prova di cristallizzazione dei Sali, dal momento che la norma suggerisce la sua pratica in caso di materiali con porosità superiore al 5%, valore verificato per tutti e 7 i provini.

Di seguito, si riportano innanzitutto le foto dei provini, prima dell'inizio della prova.

Durante la prova sono sempre state mantenute le stesse posizioni dei provini, sia in soluzione che in forno, osservabili nelle foto 200 e 201, al fine di evitare confusione nell'identificazione degli stessi, dal momento che la prova è di tipo distruttivo ed i provini sono identificati tramite il numero segnato con pennarello nero sulla loro superficie, quindi facilmente cancellabile; metodo di identificazione diverso da quello suggerito dalla norma di riferimento, ciò non influisce sui risultati della prova.

Come è possibile osservare dalla stessa immagine Figura 200, i contenitori richiesti da normativa sono cubi cavi in polistirolo bianco, forniti di coperchio, per ridurre un possibile fenomeno di evaporazione dell'acqua e per mantenere il più possibile costante la temperatura durante le due ore previste in soluzione.

Figura 156

Figura 157

La soluzione, come indicato da normativa, deve contenere il 14% di Sali, perciò, per ottenere tale concentrazione sono stati fatti disciogliere per ogni ciclo 3500g di sale (vedi figura 202) in 250 ml di acqua, durante la dissoluzione è stata controllata la temperatura dell'acqua che scendesse, a causa dei Sali, fino alla temperatura richiesta di circa 20°C.

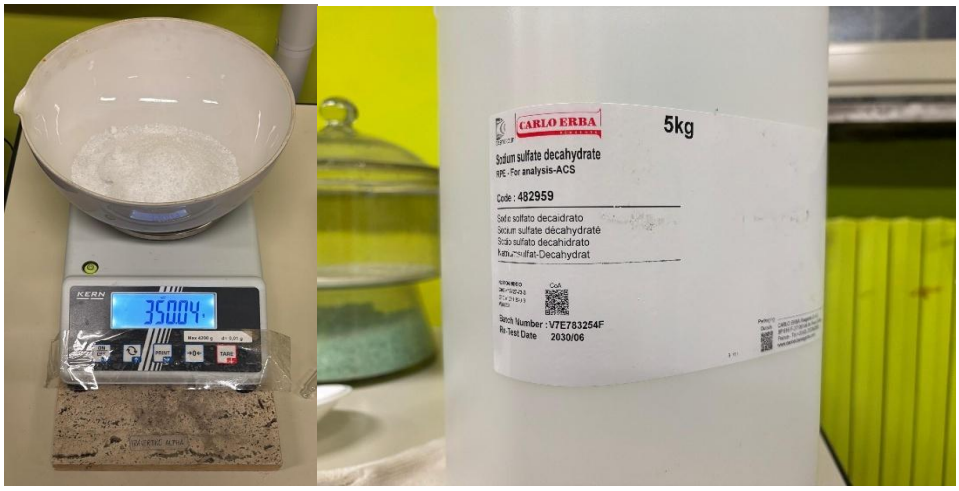
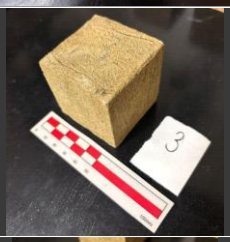
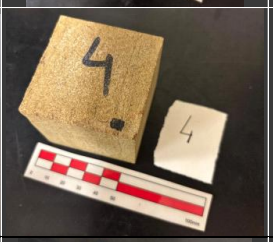
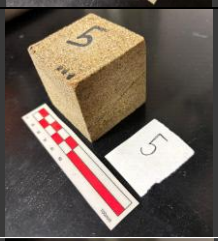
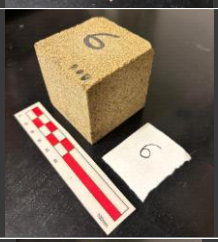
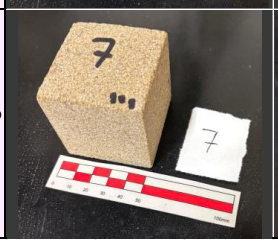
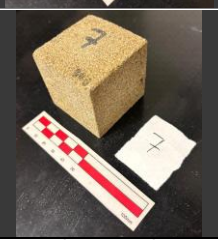


Figura 158

Di seguito, la tabella con documentazione fotografica dei provini durante la prova, in particolare sono stati fotografati ogni 5 cicli (quindi dopo il primo, quinto, decimo e quindicesimo ciclo).

Tabella 18

DATA	giovedì 22/05/2025 (post 1° ciclo)	giovedì 29/05/2026 (post 5°ciclo)	martedì 10/6/2025 (post 10° ciclo)	lunedì 16/06/2025 (post 15° ciclo)
provino 1				
provino 2				
provino 3				
provino 4				
provino 5				
provino 6				
provino 7				

Il terzo provino si è fratturato in data 12 giugno 2025, durante il 14° ciclo, quindi quasi alla fine della prova. La rottura è avvenuta in corrispondenza della variazione cromatica marrone-rossastra tipica del materiale (vedi Figura 161), di cui è già stato scritto in merito. Nelle foto è possibile osservare la modalità di rottura del provino, a confronto anche con gli altri.

Figura 159

Figura 160

Figura 161

A fine della prova i provini risultano visivamente degradati, in particolare quelli ricavati dal campione #2, la cui superficie non è più liscia ma ruvida con delle piccole scanalature e delle fratture superficiali ben visibili. I provini provenienti dal campione #3 a grana leggermente più grossa, hanno visivamente subito un processo di degradazione apparentemente inferiore rispetto ai precedenti.

Basti osservare che, a fine prova, sui tre provini 5,6 e 7 è ancora visibile il numero identificativo segnato sulla loro superficie, a differenza dei provini 1, 2 e 3, in cui è del tutto sparito.

Nonostante ciò, nel momento in cui, dopo aver terminato il 15° ciclo, i campioni sono stati messi in acqua, come previsto da normativa, il 5, 6 e 7 si sono distrutti maggiormente

rispetto ai primi quattro, come è possibile osservare dalla documentazione fotografica riportata di seguito.

Figura 162

Il grado di fratturazione, in particolare dei provini 5 e 6, è talmente elevato che risulta inutile ai fini della prova misurare il loro peso, nella prospettiva in cui se questi fossero stati elementi decorativi o strutturali di un edificio o monumento, andando incontro ad una fratturazione simile, non rimarrebbe materiale in opera, o comunque in una quantità talmente esigua, da risultare trascurabile. Inoltre, nella normativa laddove, "la rottura del provino se questo si è disgregato o rotto in due o più pezzi, nessuno dei quali rappresenta più del 75% del campione originale dopo l'ultima essiccazione", il provino in questione non va pesato in sede finale ma va riportato solo il ciclo in cui la rottura è avvenuta.

In questo caso di studio una rottura simile non è avvenuta durante i 15 cicli ma nel momento in cui i provini sono stati immersi in acqua per circa un giorno alla temperatura di circa 23°C.

I provini 5 e 6 sono stati comunque pesati a secco, sebbene conoscere il loro peso finale, dato dalla somma delle parti in cui si sono fratturati, sia irrilevante.

Le superfici di rottura sono, quasi in tutti i provini, in corrispondenza della solita alterazione cromatica rossastra (vedi Figura).

Figura 163

Nel caso dei provini 5,6 e7 le superfici di rottura sono a circa mezzo centimetro di distanza dagli spigoli e parallele a quest'ultimi.

Figura 164

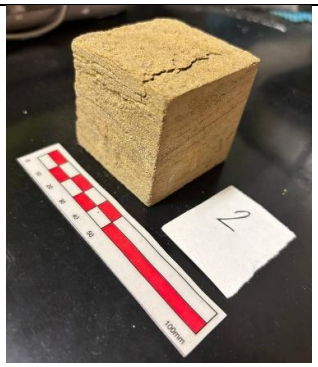


Figura 165

Figura 166

Figura 167

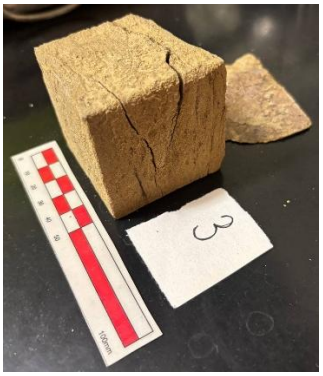


Figura 168

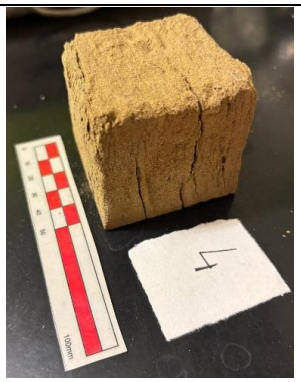


Figura 169

Figura 170

Figura 171

Figura 172

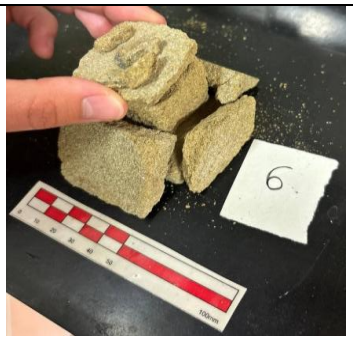


Figura 173

Figura 174

Figura 175

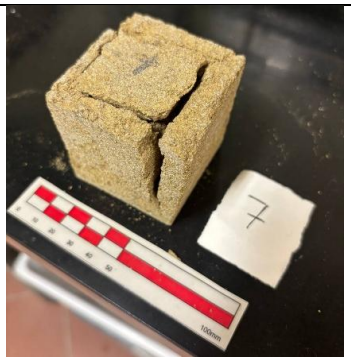


Figura 176

In tabella sono riportati i valori della massa di ciascun provino essiccato, espressa in grammi, all'inizio e al termine della prova (Md e Mf), ΔM(g) è la differenza tra la massa finale e quella iniziale, espressa sia in grammi mentre ΔM(%) è la differenza relativa delle masse prima e dopo il test (perdita o aumento di massa), espressa in percentuale. Le formule utilizzate sono le seguenti:

$$\Delta M(g) = Md - Mf$$

$$\Delta M(g\%) = \left(\frac{Md - Mf}{Md}\right) 100$$

Tabella 19

#PROVINO	Md (g)	Mf (g)	ΔM (g)	ΔM (%)	ΔMm (%)		
1_2	337.96	337.99	0.03	0.01%	-3.84%	con tutti i provini	
2_2	325.71	318.59	-7.12	-2.19%	-3.72%	senza i provini 5_3 e 6_3	
3_2	313.21	281.98	-31.23	-9.97%			
4_2	318.88	303.7	-15.18	-4.76%			
5_3	331.8	326.84	-4.96	-1.49%			
6_3	319.22	297.52	-21.7	-6.80%			
7_3	321.19	315.73	-5.46	-1.70%			

La perdita di materiale media espressa in percentuale è di circa il 4%, sia considerando che trascurando i provini 5 e 6, dunque una percentuale non così trascurabile.

3.1 Confronto tra Pietra Bigia e Pietra Serena

La Pietra Serena è un'arkose litica contenente quarzo, feldspato, clasti litici, muscovite, biotite, clorite, con quantità variabili di matrice argillosa e cemento calcitico (IUGS, s.d.); l'esame petrografico condotto in questa ricerca ha portato a definire la Pietra Bigia come anch'essa un'arkose litica feldspatica contenente quarzo, feldspato, miche, clorite, ematite e frammenti litoidi a cemento fillosilicatico/argilloso. Dunque, oltre ad appartenere alla stessa Formazione stratigrafica (Macigno-Monte Modino), le due pietre appartengono alla stessa famiglia petrografica.

Di seguito vengono presentati i risultati ottenuti dallo studio condotto da Salvatici et al., 2020, al fine di confrontare ulteriori caratteristiche della Pietra Serena con quelle della sua varietà.

Nell'articolo in questione, sono analizzati cinque beccatelli in Pietra Serena appartenenti a cinque edifici storici fiorentini diversi, che nella tabella vengono indicati con le seguenti sigle: CP, per Palazzo Corsini al Prato, GC per Palazzo Ginori Conti, SC per Basilica di Santa Croce, MR per Palazzo Medici Riccardi, SSA per Basilica della Santissima Annunziata.

Nella tabella si riportano i valori della densità apparente, espressa in $\frac{kg}{m^3}$ e calcolata secondo la formula: $\rho_b = \left(\frac{m_d}{m_s - m_h}\right)\rho_{rh}$, con $\rho_{rh} = 1000\,\frac{kg}{m^3}$ densità dell'acqua, del coefficiente di assorbimento, e della porosità aperta espressi in percentuale, dei campioni di entrambi gli studi. Dal confronto risulta che la Pietra Bigia ha una densità media apparente minore e i valori di CA e Po sono il doppio di quelli della Pietra Serena.

Tabella 20

#PROVINO	ρb (kg/m^3)	CA	Po
1_2	2454	2.69%	7.07%
2_2	2338	3.49%	8.88%
3_2	2310	3.75%	9.50%
4_2	2300	3.70%	9.31%
5_3	2402	2.97%	7.69%
6_3	2397	2.91%	7.50%
7_3	2399	2.93%	7.56%
media	2371	3.21%	8.21%
CP	2616	1.72%	4.44%
GC	2651	1.27%	3.34%
SC	2528	2.04%	5.10%
MR	2638	1.27%	3.32%
SSA	2642	1.14%	2.98%
media	2615	1.49%	3.83%

Avere la densità apparente minore significa che la pietra ha una struttura meno compatta, più friabile soprattutto se il cemento è scarso o degradato e dunque più soggetta a disgregazione meccanica, esfoliazione e perdita di materiale superficiale.

Avere la porosità aperta più elevata significa che il volume di vuoti comunicanti all'interno della pietra, attraverso cui l'acqua può penetrare e migrare è maggiore e dunque la pietra è più soggetta ad un assorbimento maggiore e più rapido dell'acqua piovana o dell'umidità ambientale, alle temperature che portano ai cicli di gelo e disgelo e alla cristallizzazione salina che provoca distacco e scagliatura. Effetti simili sono dovuti e correlati anche al coefficiente di assorbimento più elevato, che inoltre può favorire il lavaggio dei minerali più teneri (come le argille), portando a un indebolimento strutturale. Da questo confronto la Pietra Bigia risulta tendenzialmente più vulnerabile all'alterazione fisica e chimica, soprattutto in contesti esterni umidi, con sbalzi termici e diffuso inquinamento atmosferico che portano sul lungo termine ad un maggior degrado superficiale, alla perdita di integrità strutturale e alla necessità di interventi conservativi più assidui. Non a caso tra i 7 provini analizzati, quelli con i valori leggermente più alti di CA e Po, sono quelli che durante i 15 cicli di cristallizzazione hanno mostrato un degrado più evidente.

Nello studio di Salvatici et al., 2020 è stata anche condotta la prova non distruttiva degli ultrasuoni all'interno del materiale lapideo in trasmissione diretta. Nella tabella x sono riportate le misure delle velocità acquisite in trasmissione diretta, in arancione quelle dei

provini in Pietra Bigia testati in laboratorio (dal campione #1 al #4 con le rispettive misure), in azzurro quelle dei 5 beccatelli. In questo caso la Pietra Serena ha una velocità media in trasmissione diretta più elevata.

Tabella 21

	Vmisure (m/s) (trasmissione diretta)					Vmedia (m/s)	Vmedia tot (m/s)
CAMPIONE	1	2	3	4	5		
#1	1444.29	1704.88	1422.28	767.67	2161.62	1500.15	2233.31
#2	1385.32	1411.21	2866.67	2596.06		2064.82	
#3	2363.54	2526.88				2445.21	
#4	2923.08					2923.08	
CP	2616					V media tot (m/s)	
GC	3217						2401.6
SC	497						
MR	2746						
SSA	2932						

Nella tabella seguente invece sono riportate le misure delle velocità acquisite in trasmissione diretta, in arancione sui campioni #1 e #3 e in situ sulla Pietra Bigia (le sigle in tabella: MC per Monte Ceceri, Pz per Palazzo Zuccari, PBG per Palazzo Budini Gattai, SA per Chiesa di Sant'Agata, PG per Palazzo Giaconi e POB per Palazzo Orlandini del Beccuto), in azzurro le misure acquisite in situ, a Monte Ceceri e sul Palazzo Orlandini del Beccuto sulla Pietra Serena. In questo caso la velocità superficiale risulta maggiore nella Pietra Bigia. Tuttavia, questo confronto, a causa delle poche misure compiuto non può ritenersi esaustivo.

Tabella 22

	V (m/s) (trasmisisone indiretta)		Vmedia (m/s)	Vmedia tot (m/s)
#1	1810	2020	1915	2012.69
#3	1581		1581	
MC	2198	1786	1992	
PZ	2062	2516	2289	
PBG	2198	2083	2140.5	
SA	2439	1639	2039	
PG	2083		2083	
POB	2062		2062	
MC	1896		**V media tot (m/s)**	
	1896			1881.33
POB	1852			

Nel caso dei valori ottenuti con il test ultrasonico, nella ricerca esposta nell'articolo già citato, le velocità si aggirano tra 2200 e 3200 m/s con un'anomalia del valore di SC, notevolmente inferiore alla media (beccatello caduto). Inoltre, viene evidenziato il fatto che oltre ad aver il valore più basso della velocità, SC si caratterizza per avere una porosità maggiore, sintomatica della presenza di fratture o della decoesione tra i clasti; la stessa correlazione è riscontrabile anche per CP. Nel caso dei provini in Pietra Bigia, i provini ottenuti dal campione #2 sono caratterizzati da valori di Po maggiori (unica eccezione è il numero 1, che anche nella prova di cristallizzazione dei Sali è quello che rimane maggiormente più intatto tra i 4) e da valori di velocità per trasmissione diretta in media minori di quelli del campione #3. Dunque, nonostante la variabilità delle misure, la correlazione con le proprie caratteristiche intrinseche è comprovata. Ciò che non coincide con quanto dichiarato nello studio di Salvatici et al., 2020 sta nella seguente relazione: velocità minori, maggiore valore di porosità e dimensione clasti medio-grosse. Nel nostro caso studio, il campione #2 si presenta con velocità minori, maggiore porosità ma granulometria più fine. Andrebbero dunque condotte un maggior numero di prove su un campionario più numeroso e rappresentativo. Un aspetto importante che andrebbe considerato è la tipologia di cemento dei campioni esaminati.

Conclusioni

L'utilizzo della Pietra Bigia per gli elementi decorativi-architettonici delle facciate di Palazzi storici e chiese è piuttosto diffuso nel centro storico di Firenze. La maggior parte di questi risalgono al periodo compreso tra il XV e XVI secolo, pieno periodo rinascimentale della città. In generale, a meno che non siano stati soggetti ad importanti lavori di restauro e consolidamento, tali elementi si presentano in uno stato di degrado avanzato in particolare a causa di fenomeni come disgregazione, esfoliazione e distacco. Sicuramente la loro posizione nel centro storico cittadino, seppur per la maggior parte a traffico limitato, contribuisce anche alla loro alterazione cromatica, soprattutto per quegli elementi vicini alla pavimentazione stradale, sia per l'inquinamento cittadino che per incuria e vandalismo.

La Pietra Bigia si inserisce perfettamente nel tessuto architettonico fiorentino, in mezzo alla Pietraforte, di cui ne ricorda il colore e in mezzo alla Pietra Serena, talvolta nel loro passaggio naturale cromatico. Varietà della Pietra Serena, appartenente alla stessa formazione tettonico-stratigrafica del Macigno-Arenaria di Monte Modino, le due pietre presentano anche modalità di degrado molto simili.

Dal confronto condotto, la Pietra Bigia risulterebbe avere caratteristiche peggiori a livello prestazionale-meccanico e lo stato in cui sono i palazzi ad oggi rispetto ad altri in Pietra Serena, avvalora tale conclusione. Tuttavia, è ragionevole considerare la necessità di prove più approfondite e su più campioni ed è importante considerare che, come in passato Targione Tozzetti, aveva distinto le due Pietre, aveva distinto anche diverse qualità della Pietra Serena. Anche secondo recenti studi (art.) le qualità prestazionali dipendono molto non solo dalla grana ma anche dal cemento: a grana fine e con abbondanza di cemento carbonatico la pietra migliora la sua qualità prestazionale.

In conclusione, sono molteplici i fattori ambientali che influenzano negativamente la pietra e i danni e il rischio di distacco provocati oltre a rappresentare una perdita in termini di patrimonio culturale, possono essere pericolosi per i cittadini e i numerosi turisti che visitano la città.

L'acqua e ciò che ne comporta rappresenta il nemico principale di queste arenarie.

Dunque oltre a caratterizzare e conoscere le pietre che costituiscono il tessuto cittadino per la loro conservazione e pratiche di restauro, sarebbe auspicabile un monitoraggio

consapevole dello stato di degrado, delle eventuali zone di debolezza e degli elementi che nel tempo diventano instabili.

Bibliografia

Banchelli, A., Fratini, F., Germani, M., Malesani, P., & Manganelli Del Fa, C. (1997). The sandstones of Florentine historic buildings: Individuation of the marker and determination of the supply quarries of the rocks used in some Florentine monuments. *Science and Technology for Cultural Heritage, 6*(1), 11–22. Pisa-Roma: Istituti Editoriali e Poligrafici Internazionali.

Bargossi, G. M., Felli, P., & Gurrieri, F. (2008). *Pietra serena: materia della città* (A. Bartolomei & F. Montanari, a cura di). Firenze: AIDA.

BeWeB – Diocesi di Firenze. (2025, 1 giugno). *Chiesa di Sant'Agata | Firenze (FI)*. Scheda di Censimento dei beni architettonici. https://www.beweb.chiesacattolica.it/edificidiculto/edificio/91651/Chiesa+di+Sant%27Agata+%7C+Firenze+%28FI%29

Blanco, G. (2008). *Manuale di progettazione. Marmi e pietre* (a cura di R. Perris). Roma: Gruppo Mancuso Editore.

Bruni, P., Cipriani, N., & Pandeli, E. (1994). New sedimentological and petrographical data on the Oligo-Miocene turbiditic formations of the Tuscan Domain. *Memorie della Società Geologica Italiana, 48*, 251–260.

Bruni, P., Pandeli, E., & Nebbiai, M. (2007). Petrographic analysis in regional geology interpretation: Case history of the Macigno (northern Apennines). In *Special Paper 420*. Geological Society of America.

Cipriani, N., Fratini, F., Nebbiai, M., & Sartori, R. (2005). L'arenaria di Monte Senario: Caratteristiche composizionali, tecniche e confronto con la Pietra Serena. *Arkos – Scienza, Restauro e Valorizzazione dell'Architettura, 9* (gennaio/marzo), Ricerca & Tecnologia. Milano: T&T Studio.

Club Alpino Italiano – Sezione di Firenze. (n.d.). *Da Fiesole a Salviatino passando per la nascosta Fonte Sotterra e le vecchie cave di pietra di Monte Ceceri*. Recuperato il 11 luglio 2025, da https://caifirenze.it/sentiero/da-fiesole-a-salviatino-passando-per-la-nascosta-fonte-sotterra-e-le-vecchie-cave-di-pietra-di-monte-ceceri

De Silva, L., & Lambertini, A. (a cura di). (2008). *Il giardino immaginato: Arte e progetti per il giardino del Palazzo San Clemente a Firenze*. Prato: Gli Ori.

Di Sivo, M. (2004). *Atlante della pietra* [Con il contributo di Internazionale Marmi e Macchine Carrara SpA]. Torino: UTET Scienze Tecniche.

Facoltà di Ingegneria. (s.d.). *Rocce ornamentali italiane: Catalogo del Museo di Arte e Giacimenti Minerari: Sezioni rocce ornamentali e rocce mineralizzate*. Università degli Studi di Roma "La Sapienza". https://web.uniroma1.it/museoagm/sites/default/files/allegati/CATALOGO0MUSEO.pdf

FirenzeToday. (2023, 19 gennaio). Accadde oggi: l'ingresso dei Lorena a Firenze e l'Arco di Trionfo. https://www.firenzetoday.it/social/accadde-oggi-lorena-arco-firenze.html

Fratini, F., Pecchioni, E., Cantisani, E., Rescic, S., & Vettori, S. (2014). Pietra Serena: The stone of the Renaissance. *Geological Society, London, Special Publications*. Advance online publication. https://doi.org/10.1144/SP407.11

Grieco, A. (2010, gennaio). Palazzo Zuccari a Firenze: un'esperienza singolare. *Finestre sull'Arte*. https://www.finestresullarte.info/La_nota/2010/01-palazzo-zuccari-firenze.php

Hugues, T., Steiger, L., & Weber, J. (2007). *Pietra naturale* (Edizione italiana a cura di E. De Angelis). Torino: UTET Scienze Tecniche.

International Union of Geological Sciences. (n.d.). *Pietra Serena – Italy*. Geoheritage Stones. Retrieved from https://iugs-geoheritage.org/geoheritage_stones/pietra-serena/

Istituto e Museo di Storia della Scienza (IMSS). (2008, 3 gennaio). Parco di Montececeri – Cave di Maiano [Pagina luogo]. In *Brunelleschi.it*. Recuperato da https://brunelleschi.imss.fi.it/itinerari/luogo/ParcoMontececeriCaveMaiano.html

Klein, B. (1988). L'Arco di Lorena: Habsburgische Propaganda in Florenz. *Mitteilungen des Kunsthistorischen Institutes in Florenz, 32*(1/2), 253–292. https://www.jstor.org/stable/27653223

Lamma Toscana. (2025, 17 giugno). *Report giornaliero – 17 giugno 2025* [PDF]. Lamma Toscana. https://www.lamma.toscana.it/clima/report/giornaliero/report_17-6-2025.pdf

Lamma Toscana. (2025, 18 giugno). *Report giornaliero – 18 giugno 2025* [PDF]. Lamma Toscana. https://www.lamma.toscana.it/clima/report/giornaliero/report_18-6-2025.pdf

Marini, P. (2025). *Raw and waste material engineering* [Slide del corso]. Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio (LM-35), Politecnico di Torino.

Pandeli, E., Ferrini, G., & Lazzari, D. (1994). Lithofacies and petrography of the Macigno Formation from the Abetone to the Monti del Chianti areas (Northern Apennines). *Memorie della Società Geologica Italiana, 48*, 321–329.

Pietre di Rapolano. (2021). *Le cave di Pietra Serena di Montececeri a Fiesole*. Recuperato da https://www.pietredirapolano.com/le-cave-di-pietra-serena-di-montececeri-a-fiesole/

Regione Piemonte. (n.d.). *Le pietre ornamentali: aspetti tecnici, ambientali, territoriali e paesaggistici*. In *Attività estrattive – Sviluppo regionale*. Estratto il 25 giugno 2025, da https://www.regione.piemonte.it/web/temi/sviluppo/attivita-estrattive/pietre-ornamentali

Regione Toscana, Toscana Promozione, Ministero dello Sviluppo Economico, & Istituto Nazionale per il Commercio Estero. (n.d.). *The Tuscan stone identities*. [S.l.]: Regione Toscana.

Rock-Color Chart Committee. (2009). *Geological rock-color chart with genuine Munsell® color chips* (Revised ed.). Munsell Color.

Salvatici, T., Calandra, S., Centauro, I., Pecchioni, E., Intrieri, E., & Garzonio, C. A. (2020). Monitoring and evaluation of sandstone decay adopting non-destructive techniques: On-site application on building stones. *Heritage, 3*(4), 1287–1301. https://doi.org/10.3390/heritage3040071

Sartori, R. (2002). *Pietre e "marmi" di Firenze: Notizie storiche, antiche cave, genesi e presenza nei monumenti*. Firenze: Alinea Editrice.

Toscanatura.it. (n.d.). *ANPIL Montececeri – Riserva naturale di interesse locale*. Recuperato, da https://www.toscanatura.it/pages/riserve/riserva?id=5

Visit Tuscany. (n.d.). *Il Parco di Montececeri*. Recuperato da https://www.visittuscany.com/it/attrazioni/il-parco-di-montececeri/

Wikipedia contributors. (n.d.). *Arco di Trionfo (Firenze)*. Wikipedia, l'enciclopedia libera. URL https://it.wikipedia.org/wiki/Arco_di_Trionfo_(Firenze)

Appendici

Appendice A

Campione #1

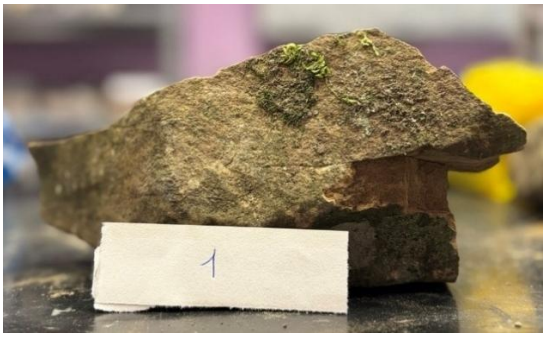


Figura 177

Figura 178

Figura 179

Figura 180

Campione #2

Figura 181

Figura 182

Figura 183

Campione #3

Figura 184

Figura 185

Figura 186

Figura 187

Campione#4

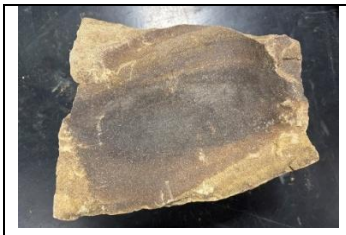


Figura 188

Figura 189

Figura 190

Figura 191

Figura 192

Appendice B

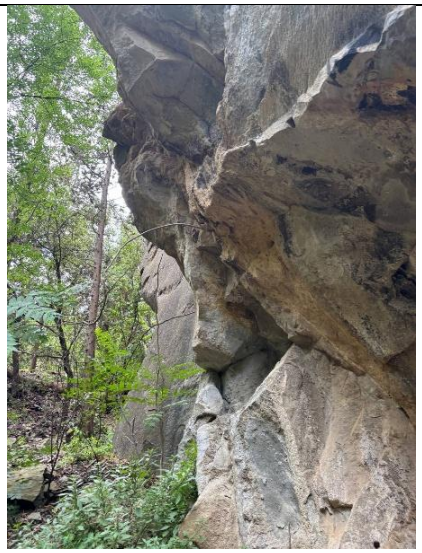


Figura 193- Monte Ceceri #1 (Pietra Serena – misurazione su parete rocciosa verticale, possibile presenza della varietà Bigia)

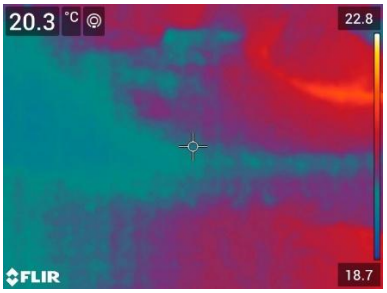


Figura 194-

Figura 195

Figura 196- Monte Ceceri #2(Pietra Bigia- misurazione su masso da cui sono stati estratti i campioni #1, #2, #4)

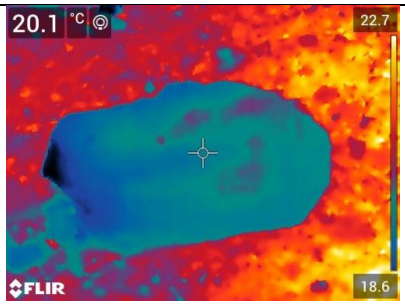


Figura 197-acquisizione con termocamera Monte Ceceri #1 (masso in Pietra Bigia)

Figura 198-Immagine a colori reali corrispondente all'acquisizione termografica in Figura 12

Figura 199- Monte Ceceri #2 (Pietra Serena, misurazione su parete rocciosa caratterizzata da striature di colorazione rossastra attribuibile alla presenza e all'ossidazione dei minerali ferrosi (come ematite), derivanti dall'alterazione dei feldspati contenuti nella roccia)

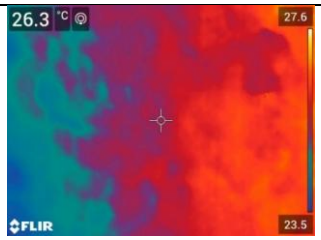


Figura 200-

Figura 201-

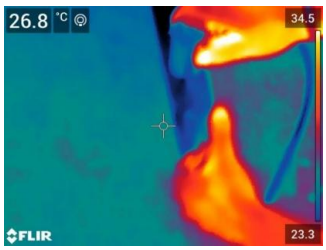


Figura 202-

Figura 203

Figura 204- Monte Ceceri #3 (Pietra Serena, misurazione su parete rocciosa caratterizzata da variazioni di colore, sul rossastro e sul giallo-bruno, a causa dello stesso fenomeno descritto in Figura 12)

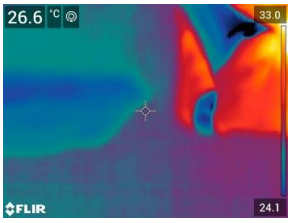


Figura 205

Figura 206

Figura 207

Figura 208-

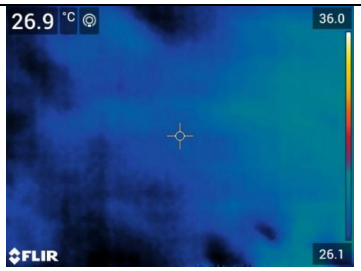


Figura 209

Figura 210

Figura 211- Palazzo Zuccari #1 (Pietra Bigia- misurazione su superficie ruvida e piana)

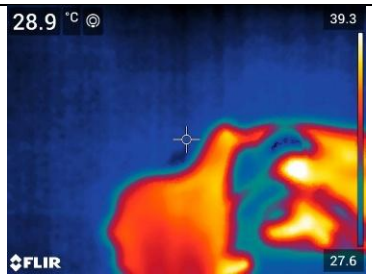


Figura 212

Figura 213

Figura 214- Palazzo Zuccari #2 (Pietra Bigia- misurazione su superficie ruvida ed irregolare)

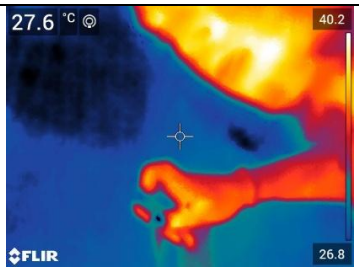


Figura 215

Figura 216

Figura 217- Palazzo Budini Gattai #1(Pietra Bigia-misurazione su superficie ruvida e abbastanza piana, al momento della prova esposta al sole)

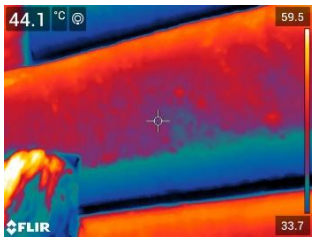


Figura 218

Figura 219

Figura 220- Palazzo Budini Gattai #2(Pietra Bigia, misurazione su superficie ruvida e abbastanza piana, al momento della prova esposta al sole)

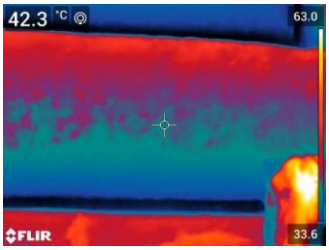


Figura 221

Figura 222

Figura 223- Chiesa di Sant'Agata #1(Pietra Bigia, superficie piana)

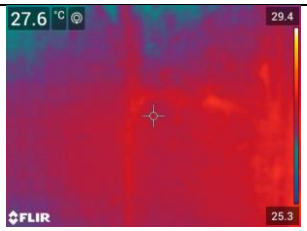


Figura 224

Figura 225

Figura 226- Chiesa di Sant'Agata #2 (Pietra Bigia, superficie ruvida abbastanza piana)

Figura 227- Basilica di San Marco (Pietra Forte, misurazione su superficie ruvida e piana)

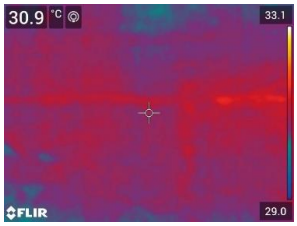


Figura 228

Figura 229

Figura 230- Palazzo Giaconi (Pietra Bigia, misurazione su superficie ruvida e piana, al momento della prova esposta al sole)

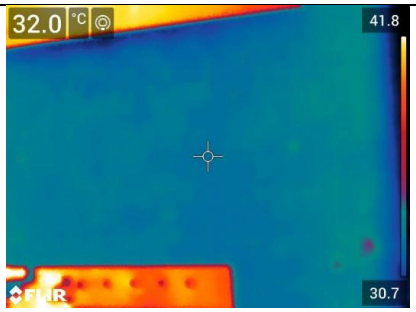


Figura 231

Figura 232

Figura 233- Palazzo Orlandini del Beccuto #1 (Pietra Bigia, misurazione su superficie ruvida e abbastanza piana, al momento della prova esposta al sole)

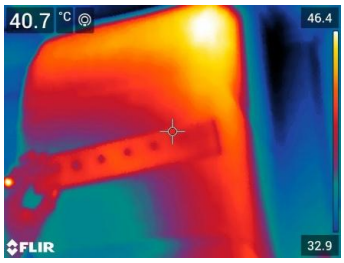


Figura 234

Figura 235

Figura 236- Palazzo Orlandini del Beccuto #2 (Pietra Forte, misurazione su superficie ruvida e piana, al momento della misurazione parzialmente esposta al sole)