



Università degli Studi di Cagliari

SCUOLA DI DOTTORATO IN INGEGNERIA E SCIENZE PER
L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

Dottorato di Ricerca in Difesa e Conservazione del suolo,
Vulnerabilità ambientale e Protezione idrogeologica

Ciclo XXV

**APPLICAZIONE DI TECNICHE DIAGNOSTICHE NON
DISTRUTTIVE PER LA CARATTERIZZAZIONE DEI
MATERIALI COSTRUTTIVI DI NATURA CARBONATICA**

GEO/10 GEOFISICA DELLA TERRA SOLIDA

Tesi di Dottorato del Dott. Giuseppe Diana

Relatori: Prof.ssa Silvana Fais, Prof.ssa Concetta Ferrara
Coordinatore Dottorato: Prof. Felice Di Gregorio

Anno accademico 2011 – 2012

A Sara

INDICE

Introduzione	<i>Pagina 5</i>
Stato dell'arte delle applicazioni non distruttive nella caratterizzazione dei materiali costruttivi	7
CAPITOLO 1	
TECNICHE DIAGNOSTICHE UTILIZZATE NELLO STUDIO	19
Premessa	19
1.1 Costanti elastiche e propagazione delle onde	20
1.2 Tipologie di onde e loro relazione con gli indici di qualità	22
1.3 Tecniche ultrasoniche	23
1.4 Tecniche termografiche	30
1.5 Tecniche minero-petrografiche e fisiche	34
CAPITOLO 2	
SPERIMENTAZIONI EFFETTUATE SUI CALCARI OLIGOMIOCENICI DI CAGLIARI	40
Premessa	40
2.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO	41
2.1.1 CENNI SUI PROCESSI DI DEGRADO DELLE ROCCE CARBONATICHE	47
2.2 SPERIMENTAZIONE IN LABORATORIO	51
2.2.1 Descrizione macroscopica dei campioni	52
2.2.2 Misure ultrasoniche	54
2.2.3 Confronto tra dati ultrasonici e contenuto in carbonati	63
2.2.4 Analisi diffrattometriche	65
2.2.5 Analisi in microscopia ottica	71
2.2.6 Misure di densità assoluta	79
2.2.7 Misure di assorbimento d'acqua	81
2.3 RILIEVI ULTRASONICI E TERMOGRAFICI IN SITO	83

2.3.1	Edifici di interesse storico oggetto di studio	84
2.3.2	Complesso dell'Exmà	88
2.3.3	Torre di San Pancrazio	110
CAPITOLO 3		
SPERIMENTAZIONI EFFETTUATE SUL CALCARE		
“GLOBIGERINA LIMESTONE” DI MALTA		
		120
	Premessa	120
3.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	122
3.1.1	CENNI SUI PROCESSI DI DEGRADO DEL <i>GLOBIGERINA LIMESTONE</i>	126
3.2	SPERIMENTAZIONE IN LABORATORIO	129
3.2.1	Descrizione macroscopica dei campioni	131
3.2.2	Misure ultrasoniche e termografiche	134
3.2.3	Confronto tra dati ultrasonici e contenuto in carbonati	142
3.2.4	Analisi diffrattometriche	143
3.2.5	Analisi in microscopia ottica	146
3.2.6	Misure di densità assoluta	154
3.2.7	Misure di assorbimento d'acqua	156
3.3	RILIEVI ULTRASONICI E TERMOGRAFICI IN SITO	158
3.3.1	Edifici oggetto di studio	159
3.3.2	Antica sede universitaria di Valletta	161
3.3.3	Attuale sede universitaria di Msida	169
	SINTESI DEI RISULTATI	173
	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	180
	Ringraziamenti	182
	Bibliografia	184

Introduzione

Gli edifici e le strutture civili, siano essi storici o moderni, costruiti in muratura o utilizzando pietre naturali o calcestruzzo, necessitano di una continua manutenzione. Questo fatto ha assunto un'importanza sempre maggiore negli ultimi anni, fino a diventare talvolta una necessità improrogabile. Infatti, se nel passato anche recente, si tendeva ad identificare le strutture costruite dall'uomo come qualcosa di indistruttibile e non vulnerabile, oggi, anche con l'accentuarsi della gravità dei dissesti del nostro territorio, stiamo assistendo ad un'accelerazione del degrado che affligge numerose strutture, in particolare quelle storiche e monumentali.

Fortunatamente, anche se solo di recente, la questione della manutenzione e del restauro conservativo ha assunto un'importanza maggiore rispetto al passato. Si assiste, negli ultimi anni, ad un incremento nella quantità delle normative destinate alla difesa del nostro patrimonio artistico e strutturale, per quanto l'applicazione delle stesse risulti spesso ancora troppo complessa. La ricerca nel settore della salvaguardia dei Beni Culturali ha fatto molti progressi e si stanno moltiplicando gli sforzi nell'identificazione dei livelli di sicurezza del patrimonio edilizio esistente e nell'identificazione dei fattori che ne causano il degrado. Il presente studio si inquadra principalmente in questo contesto.

Le nuove esigenze legate alla tutela del patrimonio culturale hanno favorito lo sviluppo delle competenze attinenti alla diagnosi dello stato di conservazione degli edifici storici e moderni e hanno stimolato il progresso delle tecniche di monitoraggio temporale delle situazioni di degrado strutturale.

Insieme ai metodi consueti di controllo, si stanno sempre più spesso utilizzando i metodi diagnostici non distruttivi, che incontrano sempre più il favore dei tecnici, proprio per la loro scarsa invasività e la scarsa o nulla interferenza con le strutture oggetto d'investigazione.

Le Prove non Distruttive sono l'insieme di indagini, sperimentazioni e tecniche che permettono di analizzare lo stato di conservazione di un elemento o di una struttura senza interferire con il suo stato di fatto e senza modificarne le sue caratteristiche fisiche. Esse vengono utilizzate anche per la ricerca di eventuali difetti e spesso vengono indicate con l'acronimo PnD oppure CnD (Controlli non Distruttivi) o anche, nell'area anglosassone con NDT (*Non-destructive Testing*).

Le PnD, oltre al principale vantaggio di non interferire con le caratteristiche fisiche degli elementi testati, hanno anche altre importanti caratteristiche che ne rendono l'applicazione molto vantaggiosa. Spesso le strumentazioni sono progettate in modo da permettere di

effettuare un'indagine che può coprire vaste porzioni delle strutture. Inoltre, non modificando lo stato di fatto della struttura, mediante tali tecniche risulta possibile ripetere le indagini nel tempo negli stessi punti di controllo. Le strumentazioni sono molto versatili e consentono di effettuare analisi sia in laboratorio che in situ, come in molti lavori scientifici (e.g. Fais *et alii*, 2002, 2005, 2009, 2010; Christaras *et alii*, 1994a, 1994b, 1997; Diana *et alii*, 2011).

Gli scopi di questa ricerca includono la realizzazione di controlli non distruttivi (con tecnica ad ultrasuoni e termografica ad infrarossi) su rocce carbonatiche del Bacino Mediterraneo, in particolare sui campioni dei calcari oligo-miocenici di Cagliari e sui campioni del cosiddetto “*Globigerina Limestone*”, calcare oligo-miocenico di Malta. Inoltre sono stati effettuati controlli in situ su edifici storici e moderni delle predette località.

Questo lavoro offre un esempio di come sia possibile distinguere i diversi tipi di calcare analizzato e conoscere le loro caratteristiche fisiche utilizzando metodi analitici non-distruttivi -ultrasonici e termografici- (nel caso del *Globigerina Limestone*, in maniera inedita). In particolare, per quest'ultimo litotipo, ci si è posti l'obiettivo di offrire un'alternativa ai metodi classici di riconoscimento visivo del materiale, utilizzando metodi oggettivi e scientifici.

Le investigazioni effettuate hanno incluso misure ultrasoniche su un rilevante numero di campioni di diversi tipi di calcare, rilevazioni termografiche di laboratorio, indagini ultrasoniche in situ, studi termografici per investigare sulla presenza e sulle dinamiche di movimento dell'umidità nei differenti tipi di calcare. Inoltre, si è potuta verificare l'efficacia dell'utilizzo coordinato della tecnica ultrasonica e termografica. Tutte le sperimentazioni effettuate hanno consentito la verifica dell'efficacia delle tecniche diagnostiche utilizzate nella complessa distinzione dei tipi di calcare e nello studio sullo stato di conservazione dei materiali in opera. Infatti, è stato possibile, mediante le suddette tecniche, indagare sul tipo e sulla qualità del calcare utilizzato nelle costruzioni studiate ed effettuare una diagnosi sullo stato di conservazione di vaste aree delle strutture. Nelle sperimentazioni effettuate nelle strutture in situ, è stata attuata una proficua ricerca sulla disgregazione in atto. Inoltre, tramite confronto delle analisi eseguite su strutture monumentali e moderne, è stato possibile individuare eventuali utili correlazioni tra le mappe di velocità ultrasonica in situ e l'*imaging* infrarosso.

È importante sottolineare che le analisi diagnostiche di tipo non distruttivo, come quelle effettuate nel presente studio, risultano utili anche al fine di poter effettuare più consapevolmente eventuali interventi di restauro.

Stato dell'arte delle applicazioni non distruttive nella caratterizzazione dei materiali costruttivi

Lo sviluppo delle tecniche di indagine nel campo delle Prove non Distruttive è stato stimolato e continua ad evolversi grazie all'introduzione di nuove strumentazioni e al miglioramento di quelle esistenti. È necessario sottolineare che certi tipi di strumenti, utilizzati correntemente nelle Prove non Distruttive, erano stati progettati in origine per finalità differenti, si pensi ad esempio, ai controlli eseguiti con i metodi ultrasonici, originariamente utilizzati per i controlli nel campo metallurgico e utilizzati attualmente in larga misura per i controlli delle strutture sia storiche sia attuali.

Le PnD vengono utilizzate ormai da molti decenni, il loro utilizzo è stato incrementato notevolmente e approfondito durante la seconda guerra mondiale. In questo contesto, la notevole quantità di armamenti prodotti, necessitava di un controllo approfondito, che poteva essere svolto efficacemente solo utilizzando queste tecniche. Infatti, mediante l'applicazione delle PnD è possibile controllare, come si effettua oggi correntemente, un grande numero di elementi in maniera celere.

Tra i primi studiosi che utilizzarono gli ultrasuoni per rilevare difetti nei mezzi solidi, tramite utilizzo di due trasduttori, ci fu Mulhauser (1931). Successivamente Firestone (1940) introdusse la metodologia *Echo Pulse* (indicata anche come "tecnica per riflessione") (<http://www.ob-ultrasound.net>), che si basa sulla riflessione degli ultrasuoni che si verifica al passaggio di zone di discontinuità di caratteristiche elastiche nei materiali. Con l'avvicinarsi della fine della seconda guerra mondiale, alcuni ricercatori iniziarono ad applicare con successo la diagnostica ad ultrasuoni anche nel campo medico (e.g. Dussik, 1952).

Lo sviluppo delle tecniche nel campo dei materiali che rispetto al metallo presentano caratteristiche di disomogeneità strutturale e composizionale e sono, quindi, più complessi da analizzare con tecniche non distruttive (come i materiali da costruzione: pietre ornamentali, laterizi, calcestruzzi etc.), è stato più tardivo e molto più lento rispetto alle applicazioni in metallurgia. La ragione di questo ritardo nell'utilizzo delle PnD nel campo delle costruzioni non è da ricercare nella mancata esigenza di controlli e diagnosi, ma essenzialmente nelle difficoltà che si incontravano nell'applicazione di tali tecniche nei mezzi fortemente anisotropi quali i materiali utilizzati nelle costruzioni. Quindi è stato necessario che le tecniche si sviluppassero ulteriormente, grazie al progresso scientifico, prima di poter essere applicate con affidabilità e sicurezza anche nella diagnosi dei materiali da costruzione e delle strutture.

Le nuove applicazioni alle strutture hanno portato, come conseguenza, alla comparsa sul mercato di strumentazioni da utilizzare esclusivamente per l'analisi dei materiali non omogenei. Inoltre c'è stata, come ulteriore e ovvia conseguenza, la comparsa di software dedicati che hanno consentito il progresso delle analisi digitali e soprattutto una efficace restituzione computerizzata dei risultati di tale analisi.

Nelle prime sperimentazioni si cercava semplicemente di individuare i difetti nascosti e analizzare la resistenza delle strutture anche nelle condizioni di dissesto, in secondo luogo si cercava di tenere sotto controllo l'evoluzione dei difetti individuati. Perciò, queste esigenze stimolarono l'incremento delle conoscenze delle tecniche diagnostiche principalmente di tipo ultrasonico. Lo sviluppo delle scienze, ormai approdate agli anni '70, condusse le tecniche alla possibilità di investigare sui materiali con l'intento di trovare anche piccole parti deteriorate. In questo modo nacque ed iniziò a svilupparsi una nuova materia di studio: quella delle analisi delle fratture meccaniche. Con le nuove competenze acquisite si poterono fare le prime previsioni sui cedimenti di insiemi di fratture e sul livello di aumento delle discontinuità in determinate condizioni di carico di esercizio. I nuovi strumenti, sempre più sofisticati, consentirono, da questo momento, di individuare un grande numero di difetti e tenerli sotto controllo. Pertanto si arrivò al concetto di "tolleranza del difetto", mentre nelle prime applicazioni si riusciva solo ad individuare, più o meno grossolanamente, un'anomalia. Da quel momento in poi si capì non solo che è quasi sempre presente un certo numero di piccoli difetti, ma anche che la sopravvivenza dell'elemento o della struttura è possibile anche tollerando la presenza di un certo numero di discontinuità, se la struttura è tenuta costantemente sotto controllo. Anche i progressi fatti nelle capacità computazionali e di trattamento dei segnali digitali hanno permesso un forte sviluppo degli strumenti e l'approfondimento delle procedure di analisi ed elaborazione di dati. Parallelamente, si sono sviluppate notevolmente le capacità di analisi delle caratteristiche intrinseche dei materiali ispezionati. Grazie a questi progressi, oggi si possono determinare con precisione le caratteristiche microstrutturali come la porosità e le caratteristiche intrinseche della struttura e quindi, soprattutto quelle proprietà che sono connesse con i meccanismi di deterioramento e rottura nei materiali.

Attualmente, la semplice rilevazione del difetto non è più sufficiente, è necessario comprendere la natura e le caratteristiche dei difetti, la loro forma e le loro influenze, inoltre è necessario approfondire lo studio del processo di deterioramento e resistenza dei materiali indagati.

Con l'avvento dell'economia moderna si è accelerato fortemente lo sviluppo nelle produzioni, e con esso la necessità e la richiesta di PnD come tecniche di controllo fondamentali nelle filiere di produzione. L'invecchiamento delle infrastrutture, dalle strade alle costruzioni ma non solo, anche di mezzi di trasporto come per esempio i velivoli, ha presentato nuove necessità di ricerca e di evoluzione delle tecniche non distruttive. Perciò, attualmente, fra le nuove applicazioni delle PnD c'è quella correlata all'aumento del rendimento nell'ambito della durata di esercizio delle strutture e dei processi di produzione. Integrando gli studi con una adeguata quantità di dati e con la descrizione dei difetti dei materiali durante i loro cicli di esercizio e di sviluppo, aumenta sia la quantità di informazioni sull'usura delle strutture sia la velocità con cui può essere ottenuto un miglioramento nelle fasi costruttive, con conseguente riduzione del tempo necessario al ciclo di sviluppo stesso dei materiali. Queste nuove opportunità, già sfruttate ampiamente anche per motivi bellici, nel settore della difesa e della produzione di energia, specialmente nucleare, hanno condotto, già da alcuni decenni, allo sviluppo di diversi progetti e programmi di ricerca a livello internazionale e all'affermarsi, come nuova disciplina scientifica, della Valutazione Antidistruttiva Quantitativa, indicata con l'acronimo QNDE ("*Quantitative Non-Destructive Evaluation*") (Segala, 2011). Inoltre, la forte crescita nella concorrenza globale ha accelerato fortemente lo sviluppo nelle produzioni, e con esso la necessità e la richiesta di PnD.

Il degrado di una struttura può essere considerato come un processo naturale di modificazione dei materiali costituenti o un processo indotto da incuria, e in generale, da mancanza di manutenzione. Esso comunque, si evolve sempre seguendo le interazioni tra materia costituente e forze endogene che agiscono su di essa. Queste forze possono essere di origine chimica, termica e meccanica, vengono espresse come grandezze fisiche e possono essere analizzate per descrivere il sistema ambiente-struttura. Inoltre, possono essere trovate le relazioni che intercorrono tra le varie grandezze per definire il sistema fisico. La conoscenza di tali forze che regolano l'evoluzione dello stato di conservazione del manufatto, è fondamentale per controllare la dinamica del processo di degrado. Quindi risulta necessario individuare delle relazioni per ogni caso specifico e possibilmente mettere a punto delle metodologie di misura integrate capaci di acquisire i dati necessari alla formulazione di un modello interpretativo completo e di un eventuale progetto di intervento. La necessità di individuare le cause e le grandezze direttamente correlabili con il degrado delle strutture ha spinto molti studiosi e ricercatori ad analizzare sempre più approfonditamente le caratteristiche intrinseche dei materiali. Conseguentemente, si sono evoluti anche gli studi

sulla determinazione delle caratteristiche elastiche dei materiali, che ne rispecchiano lo stato di conservazione e che possono essere attuati mediante tecniche non lesive delle strutture.

Per quanto riguarda la tecnica ad ultrasuoni -la principale tecnica utilizzata in questa ricerca-, le prime ricerche sulle caratteristiche elastiche dei materiali lapidei da costruzione sono stati sviluppati utilizzando le numerose relazioni tra velocità degli impulsi sismici, caratteristiche fisiche dei materiali e moduli elastici, che sono state studiate nei settori della ricerca applicata (quali ad esempio la prospezione dei giacimenti di idrocarburi). Lo studio delle caratteristiche petrofisiche delle rocce, correlate con la velocità di propagazione delle onde elastiche ed altri parametri acustici, è infatti uno degli aspetti più interessanti e significativi negli studi riguardanti i *reservoir* delle rocce carbonatiche e specialmente, nell'identificazione dei livelli produttivi. In particolare, per quanto riguarda le rocce sedimentarie, vi sono numerosi fattori che hanno un'influenza diretta o indiretta sui moduli elastici e sulle velocità ultrasoniche che le caratterizzano, ed uno dei più significativi è la porosità. I primi ricercatori che studiarono e condussero esperimenti sull'influenza di tale parametro sulle proprietà elastiche di alcune rocce sedimentarie furono M. R. J. Wyllie, A. R. Gregory e L. W. Gardner, che pubblicarono il loro primo lavoro nel 1956. Oltretutto, la dimostrazione che esista una certa linearità del rapporto tra porosità e velocità dell'onda di compressione in una roccia sedimentaria (ad esempio nelle rocce carbonatiche), ha favorito lo sviluppo dei metodi dinamici applicati alla definizione degli indici di qualità delle pietre da costruzione. Pertanto, considerando i suddetti studi, è stato possibile quantificare il grado di fratturazione e la porosità che sono fattori determinanti nei processi di degrado dei materiali da costruzione.

Tenendo conto degli studi effettuati negli ultimi decenni fino ad oggi, e quindi illustrando solo alcuni esempi abbastanza recenti, si possono citare alcune ricerche che sono servite anche per guidare il presente lavoro. In particolare, alcuni autori (e.g. Wyllie *et alii.*, 1956) hanno osservato che un aumento nel contenuto in argilla, nelle rocce sedimentarie, determina un decremento delle velocità ultrasoniche. Questi risultati hanno spinto un certo numero di scienziati a considerare la presenza di argilla come ulteriore fattore che controlla la velocità di propagazione delle onde elastiche. Infatti, Kowallis *et alii* (1984), confermano nei loro studi che i minerali argillosi generano una microporosità aggiuntiva nel materiale, che è costituita da pori di dimensioni inferiori a 1µm.

Gli studi sull'influenza delle microfrazioni o porosità sulle proprietà fisico-meccaniche dei materiali non sono stati condotti solo sulle rocce sedimentarie, Sousa *et alii* (2005), ad esempio, effettuano uno studio su come i parametri porosità e fratturazione influenzano le caratteristiche meccaniche di graniti utilizzati come pietre ornamentali. I risultati di questi

studi portano, anche in questo caso, ad evidenziare la stretta correlazione tra la velocità dell'onda di compressione e la porosità.

Conferma dell'efficacia delle prove dinamiche e della rispondenza delle determinazioni dei moduli elasto-dinamici con i moduli statici è anche messa in evidenza da Christaras *et alii* (1994). In questo studio antecedente rispetto a quello precedentemente citato, le prove vengono estese a differenti litologie (graniti, gessi, fonoliti, andesiti e calcari) e i risultati ottenuti mettono in luce la conformità tra misure di tipo statico e dinamico. In questo lavoro inoltre, si valutano i moduli elastici utilizzando i *range* di velocità ultrasoniche che caratterizzano le diverse litologie che vengono analizzate.

L'analisi diagnostica dei materiali costruttivi, eseguita sia in laboratorio sia *in situ*, mediante ultrasuoni, si dimostra efficace anche nella definizione dello "stato di salute" o di conservazione delle strutture. Fais *et alii* (2002, 2005, 2009, 2010), hanno effettuato studi mediante tecniche ultrasoniche integrate con analisi mineralogiche su monumenti pilota allo scopo di definire lo stato di conservazione dei materiali da costruzione. Le tecniche ultrasoniche, applicate mediante differenti modalità di acquisizione dei dati, si sono dimostrate efficaci sia nell'individuazione delle zone alterate più superficiali della struttura muraria, sia nella definizione degli spessori dell'alterazione. Le indagini sismiche, realizzate mediante tecnica tomografica, hanno permesso di individuare e ricostruire la geometria delle zone anomale all'interno della struttura muraria. L'analisi dei dati acustici e mineralogici ha consentito di ottenere informazioni quantitative sia sullo stato di conservazione dei materiali sia sulla presenza di difetti all'interno della struttura muraria (Fais *et alii*, 2002).

Un'altra tecnica non distruttiva efficacemente utilizzata nella diagnostica dei materiali costruttivi e impiegata anche in questo studio, è la tecnica termografica. Come noto, le analisi termografiche sono state efficacemente impiegate in medicina e nell'industria e, più recentemente, sono state utilizzate con successo anche in ambito edile nei controlli non distruttivi e nella verifica dell'efficienza energetica delle strutture. Negli ultimi anni sono stati fatti molti progressi in relazione alla portabilità delle strumentazioni, in modo da permetterne un facile impiego. In particolare, nell'ultimo decennio si è assistito ad un sempre maggiore interesse nelle applicazioni di tale tecnica nel settore dei beni monumentali. Ad esempio, alcuni autori (e.g. Grinzato *et alii*, 2002a), studiano la tessitura muraria e la presenza di umidità in strutture di importanza storica. Inoltre, Grinzato *et alii* (2002b), applicano la tecnica termografica su pareti affrescate, per identificare tessiture nascoste e valutare l'adesione degli affreschi ottenendo una mappatura di superficie delle fessure e dei flussi d'aria.

Inoltre, la tecnica termografica viene sempre più frequentemente impiegata anche nella diagnostica delle strutture moderne. Ad esempio Martín-Ocaña *et alii* (2004) analizzano il rendimento termico di due tipi di case rurali applicando la tecnica termografica e illustrano i risultati e i vantaggi che si possono ottenere con l'applicazione di tale tecnica. Alcuni studiosi applicano la termografia utilizzando tecniche integrate, ad esempio Theodorakeas *et alii* (2012), utilizzano la termografia cosiddetta "pulsata" insieme all'interferometria olografica per studiare le caratteristiche della superficie di base di un mosaico.

La termografia è sicuramente utile per agevolare e guidare i lavori di restauro di opere d'arte, ad esempio, Bodnar *et alii* (2012), effettuano uno studio su parti deteriorate in pareti affrescate utilizzando la suddetta tecnica. È importante evidenziare che le informazioni derivanti dall'impiego di tale tecnica riguardano le porzioni più superficiali dei materiali indagati.

In letteratura vi sono, inoltre, molti lavori in cui le tecniche non distruttive vengono utilizzate in modo integrato, quali ad esempio, quella ultrasonica e termografica (e.g. Grinzato *et alii*, 2004), per valutare lo stato di degrado di una muratura in elementi lapidei. Si possono citare altri lavori simili, come quelli di Bosiljkov *et alii* (2010), Fais *et alii* (2009 e 2010), Diana *et alii* (2011).

La legislazione e le normative delle Prove non Distruttive.

Per quanto riguarda la legislazione italiana, in edilizia, le PnD sono entrate ormai nella pratica comune. In termini di legislazione, sono previste Prove non Distruttive abitualmente ad esempio nella progettazione strutturale, nel controllo dei conglomerati e delle malte da utilizzare. Infatti, secondo l'allegato n.2 del DM 9 gennaio 1996, per quel che concerne la qualità dei conglomerati da porre in opera, questi devono rispondere a determinati parametri relativi alle resistenze a compressione. Nel caso tali resistenze, nei controlli puntuali, non siano soddisfacenti, si può procedere con i controlli non distruttivi.

Il decreto fa riferimento a due tipologie di prove:

- *prove sclerometriche* (misura del rimbalzo di una massa battente);
- *prove per trasparenza* con le quali si misura la velocità di trasmissione degli impulsi ultrasonici nel conglomerato. Il valore di tale velocità è un indice della compattezza del getto. In base al DM 9, valori superiori a 4000 m/s caratterizzano conglomerati ottimi.

In Italia, nel campo della diagnostica non distruttiva, il quadro legislativo e normativo è tutt'altro che semplice. Si deve fare innanzitutto distinzione, tra vere e proprie normative derivanti da regolamenti emanati a livello europeo, e la disciplina generale, spesso richiamata nei documenti ufficiali come "linee guida".

Mentre la disciplina generale, espressione delle varie linee guida, ha la propria fonte prevalentemente nella legislazione o in atti aventi la valenza di legge, la Normativa Tecnica viene espressa da prescrizioni emanate da enti o organizzazioni privatistiche, anche se le finalità si potrebbero definire di pubblico interesse.

Semplificando, si potrebbe dire che la disciplina generale indica se e quali tecniche si possono applicare, la Normativa Tecnica indica come devono essere applicate le varie tecniche.

Nella disciplina generale delle PnD, quando ci si riferisce a leggi, ordinanze, decreti, circolari o linee guida e quando si descrivono le fasi operative, si devono sempre richiamare particolari Norme Tecniche.

Risulta necessario, a questo punto, una breve sintesi relativa alle norme italiane ed europee:

Nella direttiva CEE 93/189 e nella legge n.317 del 21.06.1986, viene definita norma la specifica tecnica, approvata da un organismo riconosciuto ed abilitato ad emanare atti di formazione, la cui osservanza è obbligatoria. Le norme rivestono perciò carattere volontario e di indirizzo e non hanno valenza generale ed efficacia obbligatoria -non diventano quindi "regola tecnica" e quindi a carattere cogente come le norme interne- a meno che non siano espressamente incorporate in atti normativi o capitolati speciali di appalto.

L'ente normatore italiano è l'Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI) come per tutti i settori (industriale, commerciale e del terziario) escluso quello elettrico. L'UNI è un'associazione privata senza scopo di lucro composta da imprese, liberi professionisti, associazioni, industriali, associazioni scientifiche e scolastiche, pubbliche amministrazioni. L'UNI ha creato come ente federato specializzato nel settore delle costruzioni l'UNI-CEMENTO (Ente di Normazione dei Leganti idraulici; Malte, Calcestruzzi e Cemento Armato). L'ente federato elabora proposte di norme: l'UNI dopo aver eseguito le opportune verifiche ed aver suggerito eventuali modifiche, le emette come norme nazionali.

Le norme UNI vengono riscritte o aggiornate su proposte dei tecnici. Un ente normatore internazionale nell'ambito della Comunità Europea è il Comitato Europeo di Normazione (CEN) di cui fanno parte tutti i paesi della comunità. L'UNI partecipa in rappresentanza dell'Italia all'attività normativa del CEN.

Ogni norma CEN viene prodotta con norma ENV (provvisoria o sperimentale) e, quando recepita dagli organismi formatori dei paesi aderenti, come norma nazionale (EN), norma europea definitiva. Il prefisso pr alla EN (prEN) indica che la norma non è stata adottata in forma definitiva ma è in fase di approvazione.

Le norme CEN vengono esaminate ogni cinque anni e agli enti dei paesi membri viene richiesto se è ancora valida, se è da modificare o da abolire. L'ente normatore assegna alle

proprie norme un codice. Quando la norma CEN è adottata dall'Italia, il codice UNI è preceduto da EN.

Tornando alle Prove non Distruttive, esse vengono richiamate in diversi documenti ufficiali e decreti, di seguito si indicano quali sono e il loro riferimento.

1) Nella disciplina generale le PnD vengono indicate:

- Nel Testo integrato dell'Allegato 2 – Edifici – all'Ordinanza 3274 come modificato dall'OPCM 3431 del 3/5/05; “Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici”, nel paragrafo “valutazione della sicurezza di edifici in cemento armato e in acciaio” e anche nel paragrafo “valutazione della sicurezza di edifici in muratura”.

- Nel Decreto Ministeriale 14 Gennaio 2008; “Norme Tecniche per le Costruzioni” (NTC), nel paragrafo “controllo della resistenza del calcestruzzo in opera”, dove tra l'altro si indicano le norme da adottare per applicare le varie tecniche. Inoltre viene indicato come documento di riferimento le “Linee guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito mediante prove non distruttive”, emanate dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei lavori pubblici, che fa a sua volta riferimento, per le modalità applicative dei metodi, alle Norme UNI.

- Nella Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 - Istruzioni per l'applicazione delle “Nuove norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 14 gennaio 2008, nel paragrafo “collaudo statico, prescrizioni generali”, nel paragrafo “Controllo della resistenza del calcestruzzo in opera”, dove si fa ancora una volta riferimento alle linee guida indicate precedentemente; nel paragrafo “Costruzioni in muratura: proprietà dei materiali”; nel paragrafo “Costruzioni in calcestruzzo armato o in acciaio: dati necessari per la valutazione, proprietà dei materiali”; inoltre nel paragrafo “Placcatura e fasciatura in materiali compositi”, per le verifiche di sicurezza, vengono indicate, come documento di riferimento, le istruzioni CNR-DT 200/04.

E' opportuno mettere in evidenza che nei documenti enumerati, le Prove non Distruttive vengono spesso richiamate come prove complementari, addizionali e di approfondimento, questo ne aumenta l'importanza. La scelta dell'impiego delle PnD viene quindi delegata alla Direzione Lavori, ai collaudatori e in generale a chi si assuma la responsabilità della qualità e dei requisiti di determinate strutture, materiali e opere in generale.

Nel recepire i vari decreti, soprattutto l'OPCM 3431 e 3274 (per l'adeguamento sismico degli edifici), elencato sopra, varie Amministrazioni Regionali hanno emanato delle Istruzioni Tecniche, mirate a definire i criteri da seguire per l'esecuzione delle indagini diagnostiche. Anche questi documenti fanno sempre riferimento, oltre al decreto che recepiscono, a precise

norme UNI per l'applicazione dei metodi, anche se in taluni casi, come per la Regione Toscana, si pongono particolari restrizioni. Esempi:

- Regione Toscana –Giunta Regionale, Settore –Servizio Sismico Regionale, Direzione Generale delle Politiche Territoriali e Ambientali, Interventi Sperimentali di Prevenzione per la Riduzione del Rischio Sismico, Programma Regionale Vulnerabilità sismica Edifici in Cemento Armato (VSCA); allegato 1: “Istruzioni Tecniche, criteri per lo svolgimento di indagini diagnostiche finalizzate alla valutazione della qualità dei materiali in edifici esistenti [...]”.

- Regione Campania –A.G.C. LL.PP. –Settore Geologico Regionale, “Linee guida – Verifica strutturale degli Edifici in Cemento Armato in attuazione dell’O.P.C.M. 3274/03”.

Recentemente, sono stati inseriti riferimenti sulle Prove non Distruttive anche nella Direttiva 9-2-2011. Tale decreto fornisce indicazioni per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale tutelato, con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni, di cui al D.M. 14 gennaio 2008 e relativa Circolare contenente Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008. Le NTC e la relativa Circolare costituiscono il riferimento generale per tutto quanto indicato nel documento in questione.

Riportando quello che viene espresso nel documento per illustrarne il significato, questa Direttiva *“è stata redatta con l'intento di specificare un percorso di conoscenza, valutazione del livello di sicurezza nei confronti delle azioni sismiche e progetto degli eventuali interventi, concettualmente analogo a quello previsto per le costruzioni non tutelate, ma opportunamente adattato alle esigenze e peculiarità del patrimonio culturale; la finalità è quella di formulare, nel modo più oggettivo possibile, il giudizio finale sulla sicurezza e sulla conservazione garantite dall'intervento di miglioramento sismico. In particolare, il documento è riferito alle sole costruzioni in muratura [...]”*.

I riferimenti alle PnD sono presenti nel capitolo 4 “Conoscenza del manufatto”, nel paragrafo dedicato agli aspetti geotecnici. Tale paragrafo recita:

“Tutte le indagini e gli accertamenti dovrebbero essere preceduti da un accurato studio della documentazione disponibile per la costruzione in esame, riguardante la sua storia passata e recente.

Alla luce di questi studi preventivi, è possibile predisporre un piano d'indagine per accertare forma, dimensioni e materiali costituenti le strutture di fondazione, tra le possibili indagini, saranno preferiti i controlli non distruttivi, quali le prove geofisiche e tomografiche [...]”.

Nel paragrafo dedicato al rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione:

“Il rilievo materico costruttivo deve permettere di individuare completamente l’organismo resistente della fabbrica, tenendo anche presente la qualità e lo stato di conservazione dei materiali e degli elementi costitutivi. Tale riconoscimento richiede l’acquisizione di informazioni spesso nascoste (sotto intonaco, dietro a controsoffitti, ecc.), che può essere eseguita grazie a tecniche di indagine non distruttiva di tipo indiretto (termografia, georadar, tomografia sonora, ecc.) o ispezioni dirette debolmente distruttive (endoscopie, scrostamento di intonaci, saggi, piccoli scassi, ecc.). Un aspetto rilevante è la scelta del numero, della tipologia e della localizzazione delle prove da effettuare. Per una corretta conoscenza esse dovrebbero essere adottate in modo diffuso [...]”.

Nel paragrafo dedicato alla caratterizzazione meccanica dei materiali:

“[...] in alcuni casi la modellazione del comportamento strutturale, specie nei riguardi dell’azione sismica, richiede la conoscenza di parametri meccanici di deformabilità e resistenza dei materiali, ed in particolare della muratura. Tecniche diagnostiche non distruttive di tipo indiretto, quali prove soniche ed ultrasoniche, consentono di valutare l’omogeneità dei parametri meccanici nelle diverse parti della costruzione [...]. Le calibrazioni di prove non distruttive con prove distruttive possono essere utilizzate per ridurre l’invasività delle indagini di qualificazione [...]”.

2) Principali Norme Tecniche per la Diagnostica non Distruttiva:

Le Norme Tecniche sono nella maggior parte dei casi norme UNI, a queste fanno spesso riferimento i Decreti Ministeriali e i documenti ufficiali. Bisogna dire però che avendo le norme UNI delle lacune, ci si appoggia a volte a norme straniere, come le norme BS (inglesi) o ASTM (statunitensi). Inoltre, per alcuni argomenti, come il controllo degli interventi di consolidamento mediante l’utilizzo di Compositi Fibrorinforzati (FRP e CFRP), i documenti di riferimento sono invece emanati dal CNR, che ha una commissione incaricata di formulare pareri in materia di normativa tecnica relativa alle costruzioni.

Alcune delle più adottate norme che riguardano le PnD sono:

- Normal 22/86, “Misura della Velocità di Propagazione del Suono”;
- UNI EN 473, “Prove non distruttive, Qualificazione e certificazione del personale addetto alle prove non distruttive”. Questa norma stabilisce un sistema per la qualificazione e la certificazione del personale incaricato di effettuare prove non distruttive in campo industriale. Tale norma risulta quindi cogente nei controlli industriali (tipo saldature etc.). Tuttavia, la UNI EN 473 viene usata anche per la certificazione del personale addetto ai controlli sulle strutture in cemento armato, calcestruzzo, calcestruzzo precompresso, muratura, strutture metalliche e nel campo della conservazione dei beni culturali per quanto concerne le strutture

architettoniche, pur non avendo -per il momento- carattere di obbligatorietà. Gli enti che si occupano della certificazione, adottano questa norma per stabilire i criteri per la certificazione del personale che effettuano anche nel campo delle strutture (controlli su cls, cap, muratura e altri indicati sopra).

- UNI EN 13791, “Valutazione della resistenza a compressione in sito nelle strutture e nei componenti prefabbricati di calcestruzzo”;
- UNI EN 12504-2, “Prove non Distruttive, Determinazione dell’indice sclerometrico”;
- UNI EN 12504-3, “Parte 3: Determinazione della forza di estrazione”;
- UNI EN 12504-4, “Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici”;
- BS 1881-204: 1988, “Testing concrete –Part 204: Recommendations on the use of electromagnetic covermeters”;
- CNR-DT 200/2004, “Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l’utilizzo di Compositi Fibrorinforzati, materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie”.

Esclusivamente per le pietre naturali:

- UNI EN 14579, “Determinazione della velocità di propagazione del suono”.

Per la termografia:

- UNI 10824-1, “Termografia all’infrarosso: Termini e definizioni”;
- UNI EN 13187, “Rivelazione qualitativa delle irregolarità termiche negli involucri edilizi.

Naturalmente esistono molte altre norme. Tutte le UNI EN hanno valore anche nel resto dell’Europa.

La disciplina generale, pur essendo nelle sue istruzioni piuttosto esplicita, è caratterizzata da una certa astrattezza per quanto riguarda la fase esecutiva delle prove richiamate. Essa lascia, a volte, margini di discrezionalità al tecnico. A colmare questa lacuna interviene la Normativa Tecnica, la cui comprensione ed applicazione richiede una certa preparazione ed esperienza del tecnico, se non un vero e proprio *training* o percorso di studi. Infatti la maggior parte delle persone che si occupano in Italia di prove non distruttive nel campo delle strutture sono Ingegneri, Geologi o Architetti.

L’interpretazione delle indicazioni fornite da un esame PnD necessita di operatori altamente qualificati e, allo stesso tempo, di notevole esperienza. Infatti, la scarsa competenza del personale tecnico, soprattutto nel caso di controllo di particolari complessi o di valutazione

relative alla sicurezza, non garantisce la corretta interpretazione dei dati rilevati: l'esperienza e la competenza del tecnico sono di fondamentale importanza.

Nei paesi ad alto tasso di industrializzazione si è sentita da tempo la necessità di fare eseguire i controlli non distruttivi da personale opportunamente qualificato e certificato. Negli Stati Uniti all'inizio degli anni '70, l'*American Society for Non Destructive Testing* (ASNT) ha emesso la prima normativa in merito, la SNT-TC-1A, per la qualificazione del personale addetto ai controlli non distruttivi. Inoltre, negli Stati Uniti è presente anche un altro organo di standardizzazione che opera anche nel campo delle PnD: l'*American Society for Testing and Materials* (ASTM). In seguito, anche altri paesi hanno emesso normative nazionali sostanzialmente simili a quella americana. Nel 1993 il Comitato Europeo di Normazione (CEN) ha emesso la già citata norma europea EN 473, edita in Italia con la sigla UNI EN 473 “qualifica e certificazione del personale addetto alle prove non distruttive”. La norma suddivide il personale addetto all'esecuzione della PnD in tre livelli e ne definisce le competenze che possono essere così sintetizzate:

I Livello: esecuzione del controllo;

II Livello: interpretazione dei risultati e valutazione di rispondenza alle specifiche. Inoltre, il II livello dà le istruzioni per il rilievo al I livello che può perciò operare solo sotto le istruzioni del II livello;

III Livello: organizzazione del sistema di controlli non distruttivi, stesura delle specifiche e addestramento del personale.

La suddivisione nei tre livelli si applica per tutti i metodi delle PnD. La norma UNI EN 473 definisce anche le modalità per la certificazione nei tre livelli.

L'accesso al terzo livello (il più alto) della qualificazione e certificazione del personale addetto alle prove non distruttive (UNI EN 473) è molto agevolato per chi possiede una laurea in discipline tecniche. Nell'area anglosassone esiste una vera e propria figura professionale che si occupa di questi controlli che viene indicato come “*Building Inspection Engineer*” o “*Building Inspector*”. Mentre in Italia, nel mondo della diagnostica non distruttiva, di solito viene indicato come ispettore solo la persona che avendo la qualifica di terzo livello, ha l'incarico di verificare che le prove realizzate da terzi vengano effettuate secondo le norme. Questo accade per ora solo nell'ambito dei controlli nel campo industriale, dove le PnD si sono sviluppate e sono da tempo obbligatorie.

Capitolo 1

TECNICHE DIAGNOSTICHE UTILIZZATE NELLO STUDIO

Premessa

Le tecniche di indagine non distruttiva e la caratterizzazione dei materiali da costruzione con metodi cosiddetti dinamici, nella fattispecie ultrasonici, attualmente sono sempre più utilizzate. Queste tecniche hanno il pregio di poter essere utilizzate agevolmente sia in laboratorio sia in sito, in modo speditivo e affidabile. Consentono una diagnosi sullo stato di conservazione della struttura e offrono anche la possibilità di definire la presenza di eventuali parti deteriorate nonché di difetti entro i materiali.

Nelle prove per la caratterizzazione qualitativa di tipo statico, si ottiene sempre una valutazione di tipo “puntuale” e non globale, non sempre rappresentativa delle qualità generali del materiale dopo la sua posa in opera.

Quando invece si utilizzano i metodi dinamici e si effettuano delle misure ultrasoniche in sito, si ottengono dei valori di velocità ultrasonica che possono essere comparati con le velocità relative allo stesso materiale ma ottenute in laboratorio (dove si opera con le stesse modalità delle misure in sito). Per cui, quello che si ottiene è una misura di tipo globale, più rappresentativa dello stato di conservazione reale dell'oggetto.

I metodi di indagine ultrasonica si basano sull'analisi della propagazione delle onde ultrasoniche, che sono onde elastiche che si propagano nel mezzo investigato. Tramite rilevazione dei tempi di transito e successivo calcolo della velocità di propagazione degli impulsi, si possono ricavare importanti informazioni sulle caratteristiche elastiche e sullo stato di conservazione dei materiali. Infatti, la velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici dipende dalle caratteristiche fisiche, dalla tessitura e dalla composizione minero-petrografica dei materiali ma anche dall'eventuale fratturazione che i materiali possono aver subito, quindi dal loro stato di conservazione.

Le applicazioni principali e la maggior parte dei lavori scientifici che trattano le applicazioni ultrasoniche, studiano la velocità di propagazione delle onde P (primarie o longitudinali) nel mezzo investigato. Queste sono le prime che arrivano al trasduttore ricevente e i più comuni trasduttori che vengono prodotti sono adatti alla ricezione di questo tipo di impulso. Anche nel presente studio, si è preferito focalizzare l'attenzione sul rilevamento di questo tipo di onde.

I metodi acustici ad ultrasuoni si basano sull'assunto che all'aumentare della fratturazione e del degrado si ha una diminuzione della velocità di trasmissione dell'impulso ultrasonico. Mediante le tecniche acustiche, in questo lavoro, si vogliono analizzare le relazioni tra i parametri ottenuti dalle misure ultrasoniche e i parametri caratterizzanti lo stato di salute e le caratteristiche fisiche dei materiali da costruzione in studio.

Inoltre, per migliorare il processo diagnostico sui materiali e sullo stato di conservazione delle loro parti più superficiali, le tecniche ultrasoniche sono state integrate con la tecnica termografica. Tale tecnica, risulta essere risolutiva anche quando si vuole individuare la presenza di umidità, elemento che influenza negativamente la durabilità dei materiali da costruzione.

Per facilitare l'interpretazione dei dati ultrasonici e termografici, sono state utilizzate anche alcune tecniche di analisi minero-petrografica, ossia calcimetrie, diffrattometrie, analisi su sezioni sottili, misure di densità con picnometro a elio e misure di assorbimento in acqua.

1.1 Costanti elastiche e propagazione delle onde

Facendo riferimento a solidi isotropi, quando un corpo subisce una sollecitazione elastica, reagisce secondo le proprie caratteristiche elastiche e secondo modalità dipendenti dalle proprietà della sollecitazione trasmessa.

Nel caso della propagazione delle onde elastiche nei solidi, la deformazione si propaga secondo un moto ondulatorio composto da differenti tipi di onde con velocità dipendente dalle caratteristiche elastiche intrinseche del mezzo.

I materiali si definiscono "elastici" quando, dopo aver subito una deformazione direttamente proporzionale agli sforzi (forza applicata per unità di superficie), riacquistano la loro forma originaria una volta annullato lo sforzo applicato. Sono viscosi quei materiali che mantengono la deformazione subita anche dopo piccoli sforzi applicati per tempi lunghi. Si definiscono plastici i materiali che subiscono una deformazione permanente dopo l'applicazione di uno sforzo.

Le rocce e i materiali lapidei da costruzione hanno generalmente un comportamento di tipo parzialmente viscoelastico, non avendo caratteristiche di perfetta elasticità. Le leggi della teoria dell'elasticità applicate alle rocce sono valide solo per piccoli sforzi e di breve durata (Santarato, 2004).

Per sforzi di piccola entità, si hanno relazioni sforzo-deformazione di tipo lineare che rientrano nel campo di validità della legge di Hooke: $\epsilon = kF$ (ϵ : deformazione causata dallo sforzo F , k : coefficiente di proporzionalità che cambia al variare del tipo di forza applicata).

Quando una roccia viene sottoposta a sforzi di tipo statico, si comporta plasticamente ma in tempi lunghi. Uno sforzo applicato ortogonalmente alla superficie di un corpo può essere di trazione o di compressione, la forza produce una deformazione volumetrica. Negli sforzi tangenziali (di taglio) la forza è parallela alla superficie e si producono variazioni di forma. Per cui, una forza che agisca secondo una qualsiasi direzione può essere divisa nelle due componenti di trazione o compressione e tangenziale.

Nel campo di validità della legge di Hooke, la deformazione subita da un corpo si può definire come la risultante della deformazione volumetrica e di forma. La deformazione è proporzionale allo sforzo di trazione attraverso un coefficiente di proporzionalità E che viene indicato come “modulo di Young”: $E = N / \varepsilon_L$ (ε_L : deformazione longitudinale). Il modulo di Young ha dimensioni di una pressione, si misura come uno sforzo in Pa; per le rocce di solito in MPa, in N/m o in Kg/cm²).

Le deformazioni provocate dagli sforzi applicati in senso trasversale e longitudinale possono essere messi in relazione tramite il coefficiente indicato come “modulo di Poisson”: $\nu = \varepsilon_T / \varepsilon_L$ (ε_T : deformazione trasversale; ε_L : deformazione longitudinale), tale coefficiente assume valori compresi tra 0 e 0,5.

Se un corpo viene sottoposto ad una pressione “idrostatica” (sforzo dovuto ad un fluido, in cui la tensione è uguale in tutte le direzioni), si definisce il “modulo di incomprimibilità” $k = N / (\Delta V/V)$, ($\Delta V/V$: variazione di volume). Il modulo k esprime la resistenza di un corpo ad una variazione di volume, si misura in Pa o in Kg/cm².

Le costanti di Lamé vengono definite come $\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}$ e $\mu = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$, vengono misurate in Pa. La costante λ rappresenta la deformazione di volume provocata dai tre sforzi principali. La costante μ viene indicata come modulo di rigidità, rappresenta il rapporto tra sforzo tangenziale e deformazione angolare in un corpo che viene sottoposto a sforzi di taglio e che quindi è soggetto ad una variazione di forma; μ può essere definito anche con la formula $\mu = s_T / \varphi$, in cui φ è lo spostamento angolare provocato dallo sforzo di taglio. Questa costante rappresenta la resistenza di un corpo alle variazioni di forma; i fluidi non vengono sottoposti agli sforzi di taglio, per cui hanno μ pari a zero.

Il coefficiente di Poisson viene messo in rapporto con le costanti di Lamé attraverso la formula: $\nu = \frac{\lambda}{2 \cdot (\lambda + \mu)}$. Nei fluidi, essendo nullo il modulo di rigidità μ , si osserva il

massimo valore di ν (0,5); nelle rocce della crosta il valore di ν varia tra 0,2 e 0,3 (Santarato, 2004).

I moduli di elasticità possono essere messi in relazione tra loro in vari modi, ad esempio tramite le formule: $E = 2\mu(1+\nu)$ e $k = E/[3 \cdot (1-2\nu)]$. In un sistema elastico, gli sforzi variano nel dominio del tempo e i corpi sottoposti a tali sforzi riacquistano la condizione di quiete iniziale. In questo modo vengono generati dei movimenti delle particelle all'interno dei corpi stessi che costituiscono dei movimenti di tipo vibrazionale definiti come “onde elastiche”. La propagazione delle onde elastiche all'interno dei solidi è legata ai moduli di elasticità in quanto questi ultimi costituiscono la rappresentazione della reazione delle particelle di un corpo tridimensionale alle onde elastiche stesse. Per cui si può affermare che la velocità di propagazione delle onde elastiche è dipendente dalle costanti elastiche (oltre che dalla densità e da altri parametri) tipiche dei materiali in cui esse si propagano.

Tramite lo studio dei fenomeni di propagazione delle onde elastiche e della loro velocità, è possibile analizzare le caratteristiche elastiche delle rocce e dei materiali da costruzione.

1.2 Tipologie di onde e loro relazione con gli indici di qualità

Le onde elastiche (sismiche), utilizzate anche per le applicazioni nel campo delle prove non distruttive, sono riconducibili in generale a tre tipi principali: onde longitudinali, onde trasversali e onde superficiali. Le onde longitudinali e trasversali possono propagarsi all'interno dei mezzi solidi, quindi sono le perturbazioni che riguardano più strettamente l'analisi dei materiali mediante tecniche non distruttive; le onde superficiali, invece, come suggerisce la loro denominazione, si propagano solo negli strati superficiali dei solidi.

Le onde longitudinali sono onde di compressione e rarefazione (o dilatazione), vengono chiamate anche “onde primarie” (infatti sono spesso indicate come onde P) perché sono quelle che arrivano per prime ai trasduttori. Al loro passaggio nel mezzo, le particelle oscillano nella stessa direzione di propagazione dell'onda, cioè parallelamente al raggio sismico.

Le onde trasversali, hanno velocità inferiori a quelle delle onde P, per cui vengono chiamate anche “onde secondarie” (e indicate come onde S). Sono caratterizzate da un movimento oscillatorio delle particelle che avviene in una delle infinite direzioni ortogonali a quella di propagazione dell'onda.

Le onde di superficie, si possono propagare solo negli strati superficiali dei solidi e possono essere di varie tipologie. Le più note sono le onde di Rayleigh, che consistono in spostamenti delle particelle del solido secondo orbite ellittiche trasversali alla superficie esterna, e le onde

di Love, che producono una vibrazione delle particelle lungo la direzione trasversale alla direzione di propagazione dell'onda. Altri tipi di onde, utilizzate per particolari applicazioni diagnostiche di tipo industriale, sono le “onde di Lamb” e le “*guided waves*” (Pascale, 2008). Nei controlli non distruttivi vengono rilevate e studiate principalmente le onde longitudinali e secondariamente quelle trasversali. Tra le grandezze fondamentali che caratterizzano le onde e la loro trasmissione nei solidi (velocità di propagazione, ciclo, periodo, frequenza, pulsazione, lunghezza d'onda, pressione acustica, impedenza acustica e intensità) la velocità delle onde longitudinali è quella che interessa più direttamente le applicazioni di questo lavoro.

1.3 Tecniche ultrasoniche

Nell'ambito delle analisi effettuate in questa ricerca, sono stati utilizzati i metodi diagnostici di tipo ultrasonico analizzando la velocità di propagazione dell'impulso longitudinale. Tale propagazione può essere rappresentata in maniera semplificata come una vibrazione meccanica di forma circolare che si propaga in una porzione del mezzo.

I trasduttori impiegati correntemente nei controlli ultrasonici, quando sono a contatto con un mezzo di propagazione, possono essere considerati come un insieme di punti sorgente dai quali si dipartono fronti d'onda che sono la risultante delle onde sferiche di vibrazione che possiedono uguale raggio. I fronti d'onda possono essere considerati piani nel cosiddetto “campo vicino”, mentre divergono in un volume conico oltre tale limite. L'estensione del

campo vicino è data dalla formula $x_0 = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda}$, in cui D è il diametro della sorgente e λ è la

lunghezza d'onda. L'angolo di divergenza del cono di irradiazione è definito dalla relazione

$$\sin \alpha_0 = 1,22 \frac{\lambda}{D}.$$

Nei materiali lapidei, si opera utilizzando trasduttori con frequenze basse e quindi lunghezza d'onda elevate (paragonabili al diametro della sorgente di vibrazione). In questo caso il campo vicino è pressoché nullo e l'angolo di divergenza si approssima ad un valore di 90°. Le onde si propagano in tutte le direzioni con fronti d'onda che possono essere considerati emisferici. L'utilizzo di frequenze più basse per i controlli ultrasonici sui materiali lapidei e per i materiali da costruzione è motivata dalla necessità di lavorare utilizzando lunghezze d'onda che devono essere maggiori della dimensione massima delle particelle costituenti il mezzo di propagazione; ciò per ovviare al problema dell'attenuazione strutturale dovuta alla diffusione che si verifica in questi materiali. Infatti, nei materiali poco omogenei, quali sono i

lapidei e i materiali da costruzione, la propagazione delle onde è soggetta ad alterazioni (fenomeno che non avviene in mezzi omogenei come i metalli). Tali alterazioni sono causate dalle numerose superfici riflettenti derivanti da difetti intrinseci nella struttura dei materiali, come presenza di fratture di varie misure e superfici di interfaccia tra strati con caratteristiche elastiche differenti. Queste alterazioni possono essere causate anche dalla elevata porosità e dimensione dei grani che caratterizzano spesso i materiali lapidei utilizzati per la costruzione delle strutture monumentali.

L'utilizzo di lunghezze d'onda elevata implica delle conseguenze importanti, principalmente nella rilevabilità dei difetti di piccola entità. La risoluzione (dimensione minima dei difetti che possono essere rilevati) del metodo ultrasonico è legata alla lunghezza d'onda dei segnali utilizzati. Infatti risulta impossibile individuare difetti di dimensione inferiore alla lunghezza d'onda, per ottenere una risoluzione ottimale bisognerebbe utilizzare piccole lunghezze d'onda e alte frequenze (Pascale, 2008). Nei materiali lapidei e da costruzione, che sono mezzi ad alta attenuazione, come già illustrato, si devono utilizzare necessariamente basse frequenze e lunghezze d'onda elevate, per cui risulta possibile individuare solo difetti di dimensioni non troppo piccole.

Apparecchiature di controllo ultrasonico

I sistemi per analisi ultrasoniche (Figura 1.1) sono composti da quattro unità fondamentali: l'emettitore, il ricevitore, l'analizzatore (che fanno parte della parte elettronica del sistema) e i trasduttori.

L'emettitore genera l'impulso elettrico che mette in vibrazione il trasduttore trasmettitore e invia lo *start* per la misura al contatore dell'analizzatore. Gli emettitori impiegati correntemente nella maggior parte dei dispositivi per controlli ad ultrasuoni sono di tipo "aperiodico", in cui il circuito elettronico non è armonizzato con la frequenza propria dei trasduttori (in questo modo è possibile connettere trasduttori con diverse frequenze). Questo componente è a sua volta composto da un condensatore che dopo essere stato caricato con una resistenza ad una tensione analoga a quella del generatore di tensione, scarica nell'avvolgimento primario del trasformatore che è connesso al trasduttore.

Il ricevitore ha il compito di intercettare il segnale in arrivo dal trasduttore ricevente e amplificarlo per renderlo elaborabile dall'analizzatore, motivo per cui ha una struttura complessa. Tale dispositivo, che in realtà è un insieme di elementi connessi tra loro, è costituito da: un limitatore, che ha il compito di assorbire eventuali picchi di tensione o di energia che possono danneggiare gli altri elementi elettronici sensibili collegati; un

preamplificatore di carica, che amplifica la tensione del segnale in arrivo dal trasduttore ricevente; un filtro, che serve a ridurre il rumore elettrico migliorando il rapporto s/n (*signal/noise*); un amplificatore di misura, che serve a controllare e regolare manualmente il guadagno. Inoltre, il ricevitore invia all'analizzatore l'impulso dell'istante di stop della misura. L'analizzatore elabora l'impulso e, tenendo conto dell'istante di emissione e ricezione del segnale attraverso un contatore, restituisce in forma numerica il tempo di volo e predispone i dati che servono per l'elaborazione grafica dell'eventuale oscillogramma.



Figura 1.1: Apparecchiature per controlli ad ultrasuoni: (a) P.U.N.D.I.T., CNS Electronics Ltd, London; (b) IMG 5100 CSD, IMG Ultrasuoni, Mandello del Lario.

I trasduttori sono dispositivi che trasformano gli impulsi elettrici prodotti dal sistema generatore in vibrazioni meccaniche (ultrasuoni) e viceversa. Sono di importanza fondamentale nei sistemi di controllo e le loro caratteristiche influenzano fortemente i risultati delle analisi diagnostiche. Per questo motivo la scelta del tipo di trasduttori più adatti ai casi specifici rappresenta il punto di partenza di una investigazione attendibile. I trasduttori possono essere classificati secondo il principio fisico che sfruttano per convertire gli impulsi. Esistono, quindi, trasduttori piezoelettrici, ottici, elettrostatici, elettrodinamici, elettromagneto-acustici e magnetostrittivi. I trasduttori piezoelettrici sono quelli maggiormente utilizzati nei controlli ultrasonici nell'ambito civile, monumentale e nelle analisi dei mezzi non omogenei in generale. Tali trasduttori sono stati utilizzati anche nell'ambito di questa ricerca, finalizzata a caratterizzare materiali lapidei.

La piezoelettricità “è una proprietà tipica di alcuni elementi e composti che sono caratterizzati da legami chimici parzialmente ionici e privi di un centro di simmetria molecolare. Eventuali deformazioni impresse a monocristalli di tali composti alterano lo stato di equilibrio delle molecole nello spazio, trasformandole in dipoli elettrici e causando la comparsa di cariche

elettriche lungo un asse cristallografico rispetto a quello cui è impressa la sollecitazione meccanica” (Bastianini, 2008).

Tipici esempi di materiali piezoelettrici monocristallini naturali sono il quarzo, la tormalina e la berlinite, i quali vengono utilizzati raramente per la produzione di trasduttori. La fabbricazione industriale di composti monocristallini comporta processi molto complessi e costosi, per cui si preferisce la produzione di materiali ceramici sinterizzati, come il titanato di bario e lo zirconato-titanato di piombo. Tali materiali prodotti industrialmente, sono propriamente “ferroelettrici” ma acquistano caratteristiche macroscopiche di piezoelettricità tramite un processo di polarizzazione forzata sotto forte campo elettrico e alta temperatura.

Un trasduttore piezoelettrico è composto da quattro elementi principali (Figura 1.2): il componente piezoelettrico, il componente “assorbitore” (*backing*), l’adattatore di impedenza e la piastra di usura (che viene posta a contatto con il mezzo da testare). Elementi complementari sono le varie connessioni, spinotti ed elettrodi presenti nelle facce opposte dell’elemento piezoelettrico collegati allo spinotto. Tutti questi componenti sono protetti da isolatori acustici e dall’involucro esterno che li contiene.

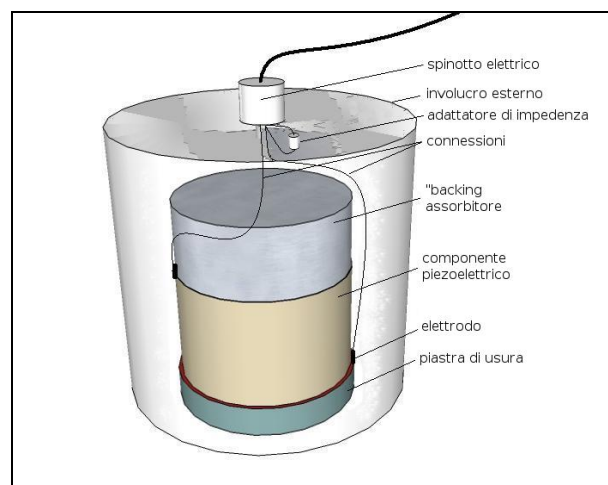


Figura 1.2: Struttura interna di un trasduttore piezoelettrico per controlli ad ultrasuoni.

L’insieme di tutti i componenti della struttura determinano le caratteristiche proprie dei diversi tipi di trasduttori, che sono la frequenza naturale, la larghezza di banda (che identifica indirettamente lo smorzamento), l’angolo di apertura del campo di irradiazione del segnale, l’impedenza acustica e l’impedenza elettrica. Tali caratteristiche influenzano le proprietà di potenza acustica, sensibilità, dissipazione e efficienza del segnale.

Le due più importanti proprietà di cui è necessario tenere conto quando si deve scegliere un trasduttore sono la frequenza e la larghezza di banda.

La frequenza naturale di un trasduttore, che viene espressa in Hz, dipende fondamentalmente dallo spessore del componente piezoelettrico. Tale parametro determina la lunghezza d'onda dell'impulso prodotto, per cui la selezione della frequenza più adatta al caso trattato deve essere fatta in base al potere risolutivo che si vuole ottenere.

La larghezza di banda viene anch'essa misurata in Hz, è definita come "l'intervallo di frequenza sotteso dalla parte di spettro dell'oscillazione libera del trasduttore che rimane al di sopra di un'ampiezza più bassa di 6 dB rispetto al valore di picco" (Bastianini, 2008). Questo importante parametro quantifica implicitamente la rapidità con cui il trasduttore risponde all'arrivo della vibrazione, ossia lo smorzamento (durata delle oscillazioni libere). Lo smorzamento (misurato in dB), legato alla larghezza di banda, viene valutato in termini di durata delle oscillazioni libere generate da un impulso elettrico ad ampiezza nota. La durata dell'oscillazione (*ringing time*) può essere misurata come "il ritardo tra i punti iniziale e finale dell'oscillogramma che hanno una determinata attenuazione rispetto alla massima ampiezza raggiunta" (Bastianini, 2008). Quindi si può affermare che il potere risolutivo nel dominio del tempo dipende dallo smorzamento. La funzione del *backing* assorbitore, costituito da materiale relativamente pesante e poroso, è proprio quella di controllare la larghezza di banda, assorbendo parzialmente l'onda regressiva e smorzandone più o meno velocemente l'oscillazione libera.

Tecniche di acquisizione e procedure esecutive

Le tecniche di prova possono essere suddivise in due tipi: la tecnica per trasmissione e la tecnica per riflessione. Nella tecnica per riflessione l'impulso ultrasonico si propaga nel materiale da testare e viene riflesso se incontra un elemento riflettente. Nelle tecniche per trasmissione (utilizzate in questa ricerca) si utilizzano due trasduttori, uno trasmittente (emittente) ed uno ricevitore che vengono posizionati in punti diversi dell'oggetto da testare. Dopo avere attraversato il mezzo, l'impulso emesso dal trasduttore trasmettitore viene ricevuto dal ricevitore, l'analizzatore dello strumento misura il tempo impiegato (tempo di volo) dall'impulso ultrasonico per percorrere la traiettoria. Una volta ottenuto il tempo di volo (o di transito), essendo nota la distanza tra il trasmettitore e il ricevitore, è possibile calcolare le velocità medie, tramite la formula $V = l/t$ (dove V = velocità media; l = distanza emettitore-ricevitore; t = tempo di transito dell'onda longitudinale). La presenza di discontinuità nel mezzo attraversato dall'impulso ultrasonico ne influenza la velocità di trasmissione, per cui da tale dato è possibile ricavare importanti informazioni riguardo le caratteristiche elastiche e di alterazione del mezzo in esame.

Le modalità di acquisizione per trasmissione possono essere divise in tre tipologie:

- Acquisizione in trasmissione diretta o “per trasparenza”;
- Acquisizione in trasmissione indiretta o “di superficie”;
- Acquisizione in trasmissione semi-diretta.

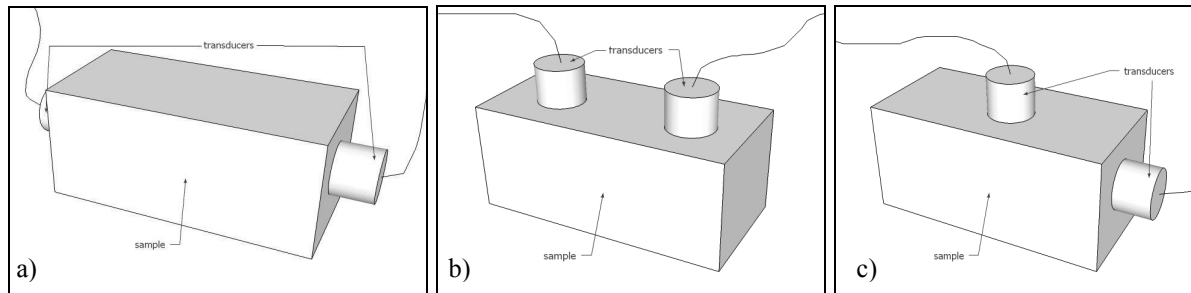


Figura 1.3: Modalità di trasmissione ultrasonica: (a) diretta, (b) indiretta, (c) semidiretta.

Nella modalità di acquisizione “diretta” si collocano i trasduttori nei lati opposti del mezzo da testare (Figura 1.3 a), in quella indiretta i trasduttori vengono collocati sulla stessa superficie dell’elemento da testare (Figura 1.3 b) mentre nella modalità di trasmissione semidiretta si collocano i trasduttori nei lati adiacenti del mezzo (Figura 1.3 c).

La tecnica di acquisizione *step by step*, utilizzata nella modalità indiretta, è un metodo di misura utilizzato spesso per indagini in sito. Tale tecnica consiste nell’effettuare le misure spostando il trasmettitore ed il ricevitore su posizioni successive mantenendo l’*offset* (distanza tra trasmettitore e ricevitore) costante. La misura dei tempi di transito dell’impulso ultrasonico longitudinale e delle distanze tra i trasduttori consente il calcolo delle velocità ultrasoniche nei punti di misura, questi valori di velocità ultrasonica vengono interpolati tramite specifici software che consentono di costruire delle mappe di velocità ultrasonica differenziale. Le mappe di velocità ultrasonica risultano molto utili per l’individuazione di zone con differenti caratteristiche elasto-meccaniche, zone di alterazione, di degrado o presenza di vuoti; esse rappresentano, inoltre, un utile strumento per realizzare le analisi delle tessiture murarie al di sotto dell’intonaco, confrontando i dati acquisiti in sito con quelli ricavati in laboratorio.

Operando in trasmissione indiretta è possibile applicare la tecnica cosiddetta “a rifrazione”, applicabile sia per definire lo spessore degli strati superficiali alterati, sia per valutare la profondità di fratture eventualmente presenti nelle superfici del mezzo. Tale tecnica di acquisizione è simile a quella utilizzata correntemente nelle prospezioni sismiche che si eseguono per le indagini del sottosuolo. In questo tipo di analisi si opera ponendo il

trasmettitore in un punto fisso di una superficie e ponendo il ricevitore in posizioni successive ad *offset* crescenti. Successivamente è possibile realizzare un profilo coniugato invertendo la posizione dei punti di trasmissione del segnale. In questo modo, seguendo le modalità operative della sismica a rifrazione, è possibile costruire il diagramma delle “dromocrone coniugate” (linee che definiscono il rapporto spazio/tempo) (Figura 1.4), analizzare la profondità della frattura o definire lo spessore degli strati alterati.

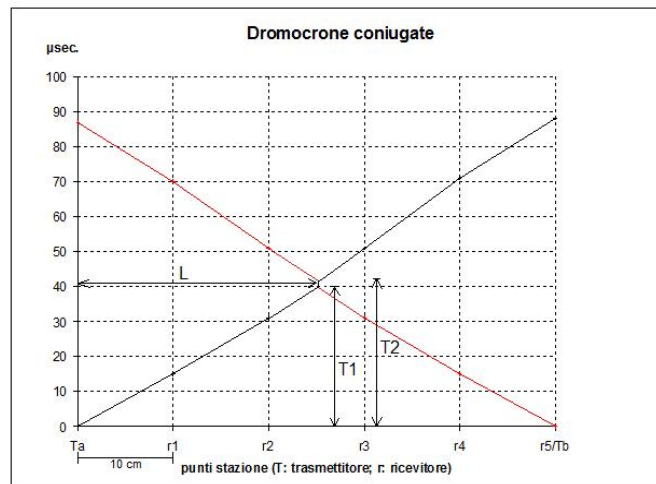


Figura 1.4: Esempio di diagramma delle dromocrone coniugate e di procedura per l’analisi della profondità delle fratture.

Utilizzando tale metodo, il controllo della profondità della frattura si esegue mediante la formula: $h = \frac{L}{2} \left(\frac{T2}{T1} - \frac{T1}{T2} \right)$, (da manuale P.U.N.D.I.T.), dove L è la distanza, misurata nel diagramma delle dromocrone, tra l’origine dell’asse x e il gradino in cui la dromocrona risulta spezzata (riportato sull’asse x); $T1$ e $T2$ sono gli estremi del gradino presente nel grafico delle dromocrone, prodotto dal ritardo dei tempi causato dalla frattura.

Inoltre, utilizzando la tecnica di acquisizione diretta è possibile effettuare una “tomografia ultrasonica”, tale metodo consiste nella misura del tempo di transito degli impulsi ultrasonici lungo varie direzioni che coprono uniformemente la sezione della struttura che si sta investigando, per poi determinarne le velocità ultrasoniche.

Tramite valutazione della velocità ultrasonica è possibile anche stimare la resistenza a compressione di una roccia o di un calcestruzzo. È importante sottolineare che tale misura è solo una stima e non una definizione precisa. Tale stima risulta affidabile solo se vengono effettuate delle affidabili calibrazioni preliminari di laboratorio tra dati ultrasonici e prove di

compressione, in modo da realizzare delle curve di correlazione tipiche per ogni litologia o tipo di materiale da costruzione.

Le procedure di esecuzione delle misure ultrasoniche nel caso delle pietre naturali (campo di applicazione di questo lavoro) sono descritte dalla norma EN 14579:2005 “Metodi di prova per pietre naturali – determinazione della velocità di propagazione del suono” e dalla Norma 22/86 (1987) “Misura in laboratorio e in sito della velocità apparente (o virtuale) di propagazione del suono (onde longitudinali) nei materiali porosi da costruzione”.

Seguendo tali norme, prima di iniziare le misure è necessario prendere nota di tutti i dati relativi alla strumentazione utilizzata (tipo di apparecchiatura e trasduttori), dei dati relativi al materiale e alle modalità di misura e delle condizioni ambientali, come temperatura e umidità relativa. Nel caso di misure di laboratorio occorre preparare le superfici dei campioni in cui avviene il contatto con i trasduttori, rendendole il più possibile lisce e pulite. Nei trasduttori si possono applicare come materiali di accoppiamento (da scegliere a seconda delle caratteristiche della superficie da trattare) apposite paste di gomma, gel ecografico o eventualmente grasso o vaselina. Nelle analisi sui *Calcari di Cagliari*, le sottilette realizzate in silicone risultano essere i migliori materiali di accoppiamento sia nelle misure di laboratorio, sia in sito (Concu & Fais, 2003); nei *Globigerina Limesone* è risultato più adeguato l’uso del gel ecografico. L’ultima operazione da effettuare prima di procedere con le osservazioni è la calibrazione del sistema di misura del tempo, in modo da eliminare l’eventuale incremento causato dal materiale di accoppiamento. La calibrazione si può effettuare “al tempo zero”, con sonde a contatto e regolando lo strumento in modo tale da ottenere il tempo nullo sul misuratore, oppure è possibile effettuare la calibrazione mediante barra a “tempo di volo fisso”, regolando il misuratore secondo il tempo prestabilito stampato sulla barra stessa.

Una volta effettuate tutte le operazioni preliminari, è possibile eseguire le misure. I due parametri di cui si tiene conto nelle misure ultrasoniche sono il tempo di transito e l’attenuazione del segnale. Per gli scopi di questa ricerca è risultato utile tenere conto del solo tempo di transito dei segnali, a partire dai quali sono state calcolate le velocità medie.

1.4 Tecniche termografiche

Le tecniche ultrasoniche possono essere integrate con tecniche termografiche che, per quanto non diano informazioni sulle caratteristiche elasto-meccaniche dei materiali, risultano utili nell’analisi degli strati più superficiali delle strutture da investigare. La termografia è la rappresentazione fotografica, realizzata con opportuni strumenti, dell’evoluzione naturale

delle condizioni che un corpo emette nel campo dell'infrarosso.

Qualsiasi corpo con temperatura maggiore dello zero assoluto, vale a dire 0 K o -273,15° C, emette calore e quindi energia nello spettro dell'infrarosso (radiazioni con lunghezza d'onda compresa tra 0,5 e 1000 μm). L'energia di radiazione di un oggetto è controllata dalla sua temperatura superficiale, che è funzione della conducibilità termica e del calore specifico, tali parametri sono l'espressione della capacità di un corpo di trasmettere e trattenere il calore (Brunetti, 2007). La temperatura di un corpo che emette calore è proporzionale alla radiazione emessa secondo la legge di Planck: $E = h\nu$, dove E è la dimensione di un "quanto di energia"; h è la costante di Planck ($6,63 \times 10^{-34}$ Wsec²); ν è la frequenza della radiazione.

Le termocamere captano i raggi infrarossi (IR) in un campo visivo tipico della regione spettrale compresa tra 2,0 e 5,6 mm e misurano la temperatura dell'oggetto che dipende dall'apporto delle radiazioni emesse (emissività ε), delle radiazioni riflesse (riflettività ρ) e delle radiazioni trasmesse (trasmissione τ). L'emissività viene espressa con la formula

$$\varepsilon = \frac{E(\text{attuale})}{E(\text{corpo - nero})}, \text{ dove } E(\text{attuale}) \text{ è l'energia emessa dal corpo in esame e } E(\text{corpo-nero})$$

è l'energia emessa dal "corpo nero". Un "corpo nero" è un corpo ideale che assorbe tutta la radiazione incidente indipendentemente dalla sua lunghezza d'onda, secondo la legge di Stefan-Boltzmann: $E = \int_0^{\infty} E(\nu, T) d\nu = \sigma T^4$, dove ν è la frequenza della radiazione luminosa, $E(\nu, T) d\nu$ rappresenta la densità di energia della radiazione elettromagnetica compresa tra ν e $\nu + d\nu$, T è la temperatura assoluta in gradi K della superficie che origina il flusso energetico E (misurato in Wm⁻²); σ è la costante universale di Stefan-Boltzmann che è pari a $5,67 \times 10^{-8}$ W (m² °K⁴) (Menditto, 2008).

La riflettività esprime la capacità di riflettere le radiazioni, la trasmissione è la capacità che ha un materiale di trasmettere le radiazioni infrarosse lasciandosi attraversare da esse (Riminesi, 2012).

Nelle apparecchiature termografiche (Figura 1.5) vengono registrate le emissioni di calore diffuse dai corpi che hanno temperatura superiore allo zero assoluto attraverso dei sensori, queste vengono trasformate in segnali elettrici che possono essere elaborati e trasformati in una vera e propria mappa di distribuzione delle temperature, il termogramma (Figura 6 b). Qualsiasi materiale che ha una temperatura al di sopra dello zero assoluto ha una particolare emissività, che può variare anche a seconda dell'alterazione o con la presenza di altri fattori, come l'umidità. Le termocamere riescono a discretizzare queste differenze di emissività, per cui le strutture con materiali differenti o caratteristiche fisiche o alterazioni differenziali in

una particolare zona possono essere individuate agevolmente nel termogramma.

Il sensore è la parte più importante e delicata di un apparecchio termografico, le caratteristiche del sensore influenzano le qualità della termocamera. Esistono sensori raffreddati (con pompa Peltier o con pompa Stirling) o non raffreddati (microbolometrici). I più accurati, utilizzati spesso per applicazioni di ricerca, sono i sensori raffreddati, ma i più diffusi e versatili (per le loro ridotte dimensioni e per l'economicità di fabbricazione) sono i sensori microbolometrici non raffreddati.



Figura 1.5: Due apparecchiature termografiche utilizzate in questa ricerca (a) termocamera con sensore raffreddato a ciclo chiuso Stirling; (b) termocamera con sensore microbolometrico non raffreddato.

Nelle termocamere, il sensore è posizionato nella parte subito retrostante la lente dell'obiettivo ed è rivestito con uno strato di ossido di vanadio la cui resistenza elettrica varia a seconda dell'irradiazione infrarossa ricevuta. Il campo di distribuzione di energia infrarossa distribuita nella lente dell'obiettivo si trasmette al sensore dove si converte in una variazione di resistenza e quindi di segnali elettrici. Tali segnali vengono a loro volta elaborati dalla parte elettronica dello strumento e convertiti in immagini (mappe termiche o termogrammi) visualizzabili su monitor o direttamente su piccoli schermi lcd presenti in molte termocamere.

La lettura del termogramma avviene attraverso una scala di riferimento delle temperature, mentre l'interpretazione dipende dalla modalità di acquisizione (attiva o passiva) e dalla fase in atto nel momento in cui viene effettuato il rilevamento (riscaldamento o raffreddamento).

Nella modalità di acquisizione attiva il calore che irradia l'elemento da testare (che influenza l'emissione di calore da misurare) viene fornito dagli operatori stessi mediante lampade apposite o altre fonti di calore; nella modalità passiva il calore che emette l'elemento da testare è quello che esso "contiene" naturalmente per via dell'ambiente o proveniente da fonti

naturali come l'irraggiamento solare.

La tecnica termografica è una tecnica risolutiva nell'individuazione di:

- Presenza o tracce di umidità nelle murature di qualsiasi tipo (Figura 1.6);
- Ponti termici;
- Presenza di elementi costruttivi di natura diversa, anche sotto (sottile) intonaco;
- Presenza di zone di disgregazione o di aree degradate;
- Vuoti o distacchi di materiale;
- Orditure e tessiture murarie;
- Presenza di elementi metallici quando non sono troppo in profondità;
- Segni di restauri o superfetazioni;
- Elementi architettonici nascosti o inglobati nelle murature;
- Tamponamenti di aperture sotto intonaco;
- Canalizzazioni di impianti termici o idrico-sanitari;
- Dispersioni termiche in generale.

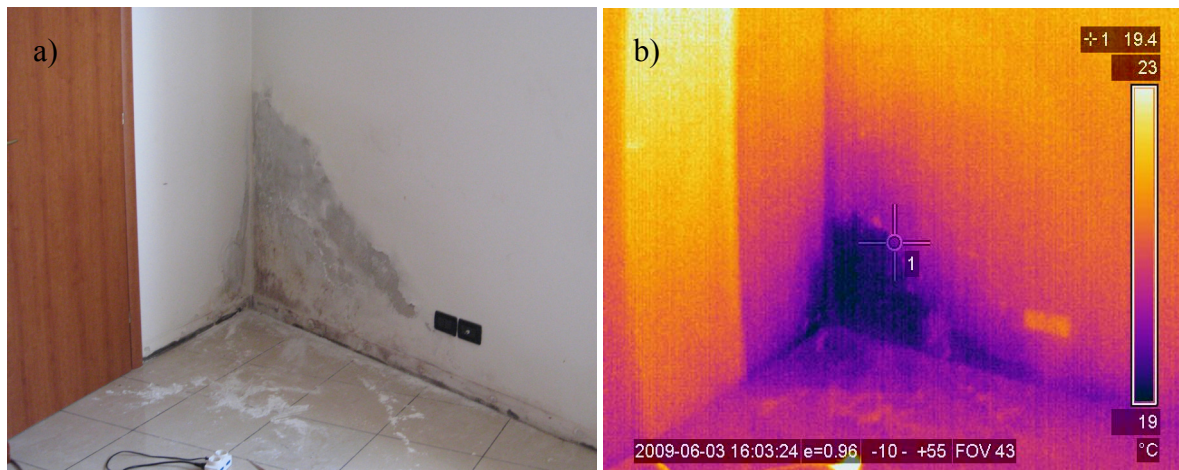


Figura 1.6: (a) immagine digitale di una parete che presenta efflorescenze; (b) termogramma della stessa parete, risulta evidente l'umidità che provoca le efflorescenze.

I dati che si ottengono con la termografia sono quindi molto utili ma è necessario precisare che è una tecnica quasi esclusivamente “di superficie”. Soprattutto se si utilizza in modalità passiva, si possono raggiungere delle profondità di indagine di pochi centimetri.

Tuttavia, nell'ambito della diagnostica non distruttiva, la tecnica termografica è quella che prevede meno disturbo sullo stato di fatto degli elementi da testare, infatti essa non necessita di contatto fisico tra componenti dell'apparecchiatura e superfici da esaminare. È quindi molto adatta per le investigazioni di strutture storico-monumentali e di particolare pregio che richiedono una speciale attenzione, spesso per la loro fragilità. Le termocamere moderne

possono essere facilmente trasportate e quindi costituiscono un metodo di indagine molto versatile e utilizzabile per indagare vaste superfici (anche a notevoli distanze di ripresa) in tempi relativamente ridotti. Inoltre, se vengono utilizzate in modo appropriato, forniscono delle mappature molto chiare da leggere e interpretare, peraltro archiviabili anche in formato digitale. La termografia consente di individuare sia la presenza di umidità, sia la presenza di eventuali zone di degrado superficiali.

1.5 Tecniche minero-petrografiche e fisiche

Nell'ambito della presente ricerca sono state utilizzate, oltre alle tecniche ultrasoniche e termografiche, diverse tecniche minero-petrografiche e di analisi classica, come calcimetrie, diffrattometrie XRD, analisi su sezioni sottili e picnometrie. In questo paragrafo si descrivono sinteticamente queste tecniche.

Analisi calcimetriche

La determinazione della quantità di carbonati contenuta in una roccia di natura carbonatica è di fondamentale importanza per poter fare delle deduzioni sugli ambienti di deposizione e per classificare con precisione le varie litologie, come nel caso dei *Calcari di Cagliari* e dei *Globigerina Limestone* di Malta. Tale determinazione si esegue per mezzo della calcimetria.

Questo metodo si basa sulla dissoluzione dei carbonati a seguito di contatto con acido cloridrico e sulla determinazione dell'anidride carbonica svolta a seguito della reazione indotta, per mezzo di un apparecchio denominato "calcimetro". Con questo metodo è possibile determinare i carbonati che possono essere contenuti nel campione (principalmente CaCO_3 , MgCO_3 e Na_2CO_3). Per l'esecuzione della prova è possibile utilizzare vari tipi di calcimetri, il più preciso è quello di Dietrich-Frühling, che permette di eseguire accurate correzioni rispetto alla temperatura (da 10 a 25° C) e alla pressione atmosferica (da 720 a 786 tor) alla quale viene effettuata la misura, inoltre, tale calcimetro permette di ottenere un risultato esprimibile alla seconda decimale (D.M. 13/09/1999 – G.U. suppl. Ordin. N° 248 – 21/10/1999).

Mediante calcimetro di Dietrich-Frühling (utilizzato anche per il presente studio), le calcimetrie vengono effettuate attaccando 0,5 oppure 1 g (a seconda del tenore in carbonati stimato) di campione polverizzato con 10 ml di HCl concentrato. Per il calcolo della percentuale in carbonati è opportuno seguire la procedura indicata nel supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale, serie generale n. 248 del 21-10-1999 (*Determinazione gas-*

volumetrica della CO_2 che si svolge trattando un campione con acido cloridrico). Quindi, seguendo tale decreto, si procede con la standardizzazione del volume del gas svolto, utilizzando la formula:

$$V_0 = \frac{V_t(P_t - \varphi)273}{760(273 + t)}$$

dove:

V_0 = volume della CO_2 svolta, corretto a $0^\circ C$ e alla pressione atmosferica di 101,325 kPa, espresso in millilitri;

V_t = volume della CO_2 svolta alla temperatura e alla pressione atmosferica alle quali è stata eseguita l'analisi, espresso in mL;

P_t = pressione atmosferica, espressa in mm di Hg, alla quale è stata eseguita l'analisi;

t = temperatura, espressa in $^\circ C$, alla quale è stata eseguita l'analisi;

φ = tensione di vapore dell'acqua alla temperatura t , espressa in mm di Hg.

Per esprimere i risultati si indica la percentuale del contenuto di carbonati desumendolo dal valore in $g \times kg^{-1}$, calcolato utilizzando la formula:

$$C = \frac{V_0 \times 0,0044655 \times 1000}{M}$$

dove C è il contenuto in carbonati, espresso in $g \times kg^{-1}$.

Analisi diffrattometriche XRD

I raggi X furono scoperti nel 1895 da Wilhelm Röntgen, essi rappresentano la porzione dello spettro elettromagnetico che ha una lunghezza d'onda compresa tra circa 10 nanometri e 1/1000 di nanometro. Questa radiazione viene utilizzata per analizzare la composizione e la struttura dei cristalli e quindi dei materiali, tramite il fenomeno della diffrazione che è il principio base che viene sfruttato nella tecnica diffrattometrica XRD.

La diffrazione a raggi X è utilizzata correntemente anche per l'identificazione dei minerali costituenti delle rocce sedimentarie.

La diffrazione dei raggi X nei cristalli si origina dall'interazione tra la radiazione elettromagnetica e la materia. Gli atomi che compongono i campioni analizzati diventano punti di diffusione secondaria di raggi X della stessa lunghezza d'onda del fascio incidente. I cristalli diffrangono i raggi X perché la loro lunghezza d'onda è dello stesso ordine di grandezza delle distanze interatomiche e delle periodicità della struttura cristallina. L'interferenza che si instaura tra le onde diffratte dagli elettroni è costruttiva solo nelle

direzioni in cui le onde diffuse dagli atomi che appartengono allo stesso reticolo cristallino sono in coincidenza di fase. L'interferenza costruttiva è legata alle condizioni geometriche descritte dalle equazioni di Laue¹ e dalla legge di Bragg². Il diffrattogramma, che rappresenta la visualizzazione grafica risultante della diffrazione delle polveri, rivela le posizioni, le intensità e la FWHM (*Full Width at Half Maximum*, “larghezza a metà altezza del picco”) dei picchi di diffrazione. Tale rappresentazione esprime, quindi, le proprietà fisiche fondamentali delle fasi cristalline, fondamentali per la loro identificazione e per l'interpretazione della struttura a livello atomico e molecolare (Milanesio, 2006). Per cui qualsiasi elemento o composto cristallino ha una sua combinazione caratteristica di proprietà, rilevabile con la diffrazione XRD, che ne permette l'identificazione.

La procedura che si applica per l'esecuzione delle analisi XRD comporta diverse operazioni:

- Preparazione e polverizzazione del campione di roccia;
- Alloggiamento della polvere nel vetrino (Figura 1.7 b);
- Irraggiamento con raggi X e acquisizione dei dati (Figura 1.7 c);
- Analisi dei picchi dello spettro incognito e confronto con quelli noti contenuti nel *database* mediante *software* specifici (Figura 1.7 d);
- Interpretazione del diffrattogramma.

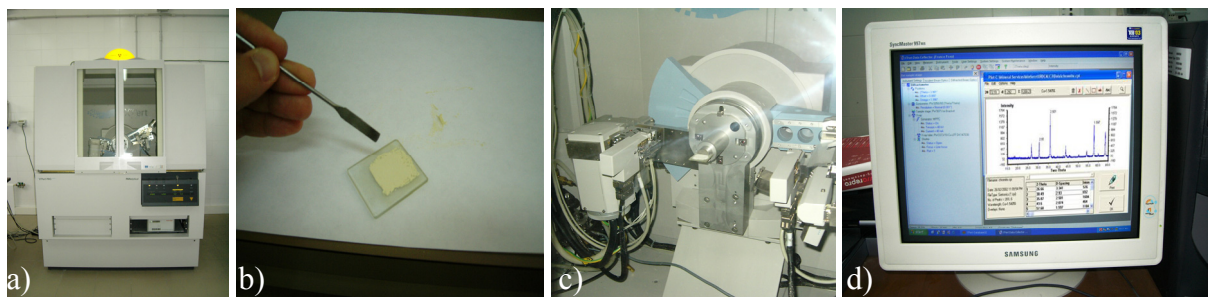


Figura 1.7: (a) diffrattometro PANalytical XPERT-PRO (utilizzato per il presente studio), (b) preparazione del campione di polvere, (c) campione in fase di irraggiamento X nella cella del diffrattometro, (d) elaborazione del diffrattogramma effettuata dal sistema di analisi.

L'accuratezza della tecnica XRD è variabile in base al tipo di diffrattometro (Figura 1.7 a) utilizzato. Una volta inserito nella cella dell'apparecchiatura, il campione viene

¹ Le equazioni (condizioni) di Laue definiscono la diffrazione dei raggi X nei cristalli, in analogia con la diffrazione della luce da parte dei reticoli ottici, considerando che la disposizione periodica tridimensionale degli atomi corrisponde ad un reticolo tridimensionale di diffrazione, l'interferenza è costruttiva solo se la differenza di percorso ottico dei raggi che subiscono *scattering* da due contigui è pari a un multiplo della lunghezza d'onda (Corrias, 2010).

² $2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$; per avere un effetto di diffrazione (interferenza positiva tra le onde elettromagnetiche riflesse dai vari piani reticolari definiti dagli indici di Miller *hkl*) occorre che la differenza di cammino ottico (Δ) fra le varie onde riflesse sia un multiplo intero della lunghezza d'onda λ (Nardini, 2010).

attraversato da una radiazione di lunghezza d'onda λ emessa da un tubo a RX (Raggi X), che viene riflessa dai piani reticolari dei diversi minerali e raccolta da un *detector* dopo aver attraversato una serie di collimatori.

Il diffrattogramma che viene elaborato dal sistema di analisi (Figura 1.7 d), consiste in un diagramma X-Y dove nell'asse X sono riportati i valori dell'angolo di diffrazione espressi in gradi di 2θ , nell'asse Y è riportata l'intensità delle diffrazioni, espressa in cps (colpi per secondo). Per quanto riguarda la fase interpretativa dei diffrattogrammi, esistono *software* specifici che, elaborando lo spettro ottenuto, permettono di effettuare una stima quantitativa dei minerali presenti nel campione investigato (Palomba, 2003).

Considerato il fatto che le diffrazioni delle diverse fasi cristalline non interagiscono tra loro, l'analisi XRD permette di risalire alla composizione qualitativa di campioni contenenti minerali diversi. L'intensità della diffrazione di ogni minerale è proporzionale alla sua quantità presente nel campione.

Analisi su sezioni sottili

Dalle analisi di laboratorio su sezioni sottili si possono ricavare molte informazioni per una corretta classificazione della roccia in esame ma anche sull'ambiente di deposizione. Grazie a queste analisi è possibile studiare le proprietà basilari delle rocce sedimentarie, che sono la tessitura, la struttura, l'orientazione (queste tre proprietà costituiscono il *fabric*) e la composizione. La tessitura è l'insieme delle caratteristiche geometriche delle rocce e può essere indotta da tensioni meccaniche subite nelle diverse fasi di formazione, da gradienti di pressione, chimici o termici; la struttura è l'insieme delle caratteristiche che descrivono la disposizione spaziale e le caratteristiche morfologiche dei vari elementi che caratterizzano la roccia, come la granulometria, la macroporosità, la forma dei grani, la presenza di stratificazioni. Dalle sezioni sottili è possibile analizzare anche la composizione di una roccia, i tre componenti principali che è possibile osservare e valutare nelle rocce carbonatiche sono: i componenti allochimici, la calcite microcristallina e la calcite spatica. I componenti allochimici sono costituiti da bioclasti ed intraclasti che si sono formati nel bacino di sedimentazione. La calcite microcristallina o "micrite" è un sedimento carbonatico sotto forma di granuli dal diametro inferiore ai 5 μm . Gran parte di essa si forma nel bacino di deposizione, sia come precipitato dell'acqua di mare oppure per disgregazione delle parti più resistenti di organismi. Per questo sedimento fine viene usato anche il termine "fango carbonatico", nonostante a rigore il termine "fango" si riferisca a materiali terrigeni con

dimensioni granulometriche dell'argilla o di un silt (ossia fino a $62 \mu\text{m}$). La calcite spatica (o "sparite" o anche "spato") si riferisce a cristalli con un diametro maggiore o uguale a $5 \mu\text{m}$. Quando presente, gran parte di essa è grossolana, con cristalli che raggiungono a volte dimensioni fino ad 1 mm. La sparite rappresenta di solito un cemento di riempimento dei pori e pertanto può formarsi nella roccia dopo la deposizione dei componenti allochimici originari e della micrite (Adams *et alii*, 1988).

L'analisi delle caratteristiche delle rocce in sezione sottile permette una classificazione precisa. Le due classificazioni principalmente utilizzate nelle rocce carbonatiche sono quella di Folk (1959), che permette una classificazione sulla base di osservazioni composizionali e quella di Dunham (1971) che è stata concepita per effettuare una classificazione su base tessiturale-strutturale.

Per quanto riguarda la preparazione delle sezioni sottili, è possibile seguire le raccomandazioni UNI 10922:2001 (Allestimento di sezioni sottili e sezioni lucide di materiali lapidei colonizzati da biodeteriogeni).

Analisi picnometriche

La densità (massa volumica) di un corpo è in generale pari alla sua massa diviso il volume che occupa. La densità di un materiale è quindi definita dal rapporto tra una quantità in peso nota di un campione e il volume di quella stessa quantità (g/cm^3).

Se m è la massa e V il volume, per la densità ρ si ha dunque: $\rho = \frac{m}{V}$. Nel Sistema Internazionale la densità si misura in kg/m^3 .

Esistono diversi tipi di densità che possono essere associate alle polveri e ai campioni solidi che si utilizzano nelle misure densimetriche:

- *densità reale o assoluta*: (massa / volume reale), questo parametro si riferisce, quindi, alla massa del campione divisa per il volume reale (che è il volume della porzione solida compreso il volume dei pori chiusi inglobati nella matrice solida del campione);
- *densità apparente*: (massa / volume apparente) riferita alla massa del campione divisa per il volume apparente (volume della porzione esclusivamente solida più il volume dei vuoti aperti, chiusi e ciechi);
- *densità di bulk*: (massa / volume totale) massa del campione divisa per il volume totale che comprende il volume della porzione esclusivamente solida più il volume dei vuoti.

La misura del volume e della densità reale di un solido viene effettuata attualmente per mezzo dei picnometri a gas.

Nel picnometro ad elio (Figura 1.8 c), utilizzato per misurare la densità assoluta, il *displacing fluid* che si utilizza per le misure è l'elio, gas che per le sue ridotte dimensioni atomiche, che si approssimano all'Angstrom (10^{-10} m), riesce a penetrare nei pori più piccoli, assicurando quindi la massima accuratezza nelle misure. Inoltre, l'elio viene utilizzato per questi scopi perché il suo comportamento è simile a quello di un gas ideale (ossia che rispetta la Legge dei gas perfetti $pV = nRT$ in qualsiasi condizione).

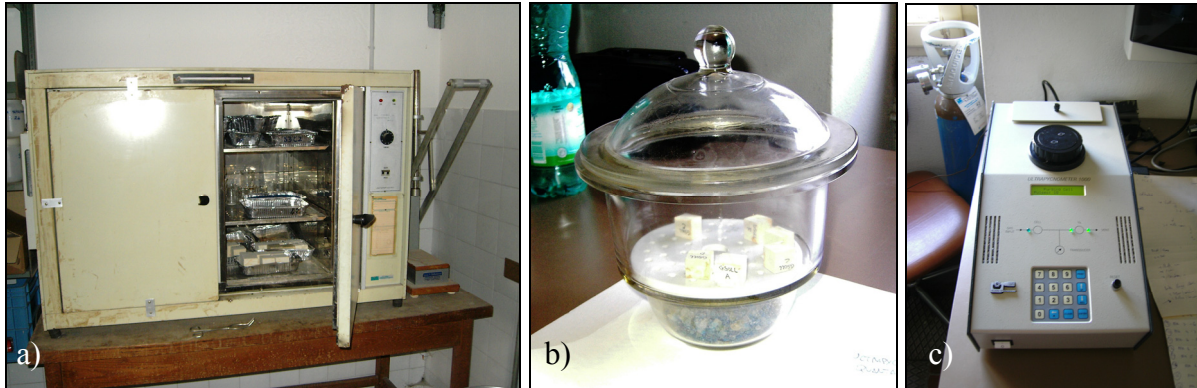


Figura 1.8: (a) muffola per essiccazione dei campioni, (b) campioni prismatici in essiccatore, (c) picnometro a elio Quantachrome Ultrapycnometer 1000 (utilizzato per il presente lavoro).

I campioni destinati alle misure mediante picnometro a elio possono essere preparati sia in forma di polvere che in forma di piccoli prismi (Figura 1.8 b) che vengono inseriti nella cella di controllo dello strumento. I campioni, prima dell'effettuazione delle misure, devono essere posti in stufa a muffola (Figura 1.8 a) per un'adeguata deumidificazione.

CAPITOLO 2

SPERIMENTAZIONI EFFETTUATE SUI CALCARI OLIGOMIOCENICI DI CAGLIARI

Premessa

Nell'area urbana della città di Cagliari è possibile ritrovare ovunque, anche in affioramento, i calcari della serie oligo-miocenica. La facile reperibilità di questa litologia, insieme alla sua facilità di lavorazione, ne hanno consentito un largo impiego come materiale da costruzione, sebbene alcune facies presentino caratteristiche elasto-meccaniche e quindi di resistenza non ottimali. Come succedeva sempre nel passato e attualmente in poche altre zone, come a Malta, per motivi economici che oggi hanno lasciato spazio alla globalizzazione, si preferiva utilizzare come pietre da costruzione le rocce che si ritrovavano vicine al luogo dove si doveva costruire. Così, molte strutture e edifici monumentali del centro storico di Cagliari, sono stati realizzati utilizzando i calcari succitati. Anche il complesso monumentale dell'Exma' e la Torre di San Pancrazio, oggetto dell'indagine in sito, sono stati edificati con l'utilizzo delle stesse litologie.

La caratterizzazione in laboratorio dei *Calcari di Cagliari* è stata effettuata mediante applicazione integrata delle tecniche ultrasoniche e termografiche, coadiuvate da analisi di tipo minero-petrografico e di alcune proprietà fisiche, come la porosità, la densità e l'assorbimento d'acqua. Questa parte dello studio ha previsto numerosi test di laboratorio che sono stati effettuati sui materiali lapidei (calcari oligomiocenici), impiegati per realizzare i due edifici monumentali oggetto d'indagine. Per effettuare questi studi sono stati prelevati campioni di roccia dai probabili siti di provenienza (fronti di cava dimessi e/o affioramenti) presenti nell'abitato di Cagliari, inoltre sono stati effettuati diversi micro campionamenti di roccia ed intonaci nei paramenti esterni delle strutture in esame.

Le conoscenze sui materiali acquisite nel corso delle analisi sperimentali effettuate in laboratorio, sono state di fondamentale importanza nella fase relativa all'applicazione delle tecniche ultrasoniche *in situ* sui due edifici monumentali. Per effettuare un'analisi approfondita delle caratteristiche elastiche dei materiali costitutivi delle strutture, sono state effettuate numerose indagini ultrasoniche, coadiuvate da analisi calcimetriche e diffrattometriche. Inoltre, nelle indagini effettuate nella Torre di San Pancrazio, la tecnica ultrasonica è stata successivamente integrata con la tecnica termografica.

2.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

In generale, la formazione marina miocenica della zona di Cagliari fa parte del grande canale marino che durante il Miocene attraversava la Sardegna dal Golfo di Cagliari a quello dell'Asinara. Le sponde di questo canale, erano costituite ad Est dal massiccio granitico dei Sette Fratelli, ad Ovest dalle ultime propaggini dei monti del Sulcis, che appaiono, ora, distanti dagli affioramenti miocenici a causa dell'avvenuta copertura da parte delle alluvioni quaternarie della fossa tettonica del Campidano. Gli strati del Miocene cagliaritano si presentano in giacitura orizzontale o debolmente inclinati. L'inclinazione non è costante ed è soprattutto in relazione con i deboli fenomeni tettonici che hanno interessato la formazione miocenica la quale presenta, in alcune zone, deboli accenni di piegamento e più frequentemente dislocazioni per frattura.

Le formazioni mioceniche di Cagliari si rinvencono presso tutte le colline della città: Monte S. Michele (120 m), Monte Claro (61 m), Is Mirrionis (112 m), Tuvixeddu (96 m), la collina di Castello, sulla quale è costruita la parte alta della città di Cagliari (97 m), Monte Urpinu (98 m), Montixeddu (65 m), Bonaria (50 m), S. Bartolomeo (94 m), Sant'Elia (156 m). Le suddette colline rappresentano i residui di un ciclo di erosione, probabilmente pliocenico (Comaschi Caria, 1958), che ha spianato la via all'ingressione marina del Tirreniano, come testimoniano i fossili ritrovati nei sedimenti.

La copertura quaternaria, tanto marina che continentale, si nota sul Miocene anche nella zona di Cagliari e precisamente nel colle di Sant'Elia, a Fangario, ai lati della strada che porta a Quartu Sant'Elena, a Monte Urpinu, etc.

La sequenza litostratigrafica del Miocene di Cagliari è costituita, dal basso verso l'alto, dalle seguenti formazioni:

- Argille di Fangario: costituite da marne argillose grigio-gialle, aventi spessore di 60 m, ricche in fossili;
- Arenarie di Pirri: costituite da arenarie grigio-giallastre a grana media, di ambiente francamente litoraneo, conglomerati a ciottoli paleozoici di facies fluvio-deltizia, spessore da 150 a 200 m;
- *Calcarea di Cagliari*: calcarea detritico organogeno suddivisibile in due membri, il membro superiore, rappresentato da calcarea bioclastico compatto ("*Pietra Forte*"), che presenta a letto "*Pietra Cantone*" (calcarea marnoso-arenaceo), la "*Pietra Forte*" rappresenta il termine più recente della successione marina miocenica della Sardegna meridionale; il membro inferiore è costituito da calcarea marnoso-arenaceo, giallastro, tenero ("*Pietra Cantone*"), che presenta a

letto le “Arenarie di Pirri” (Elveziano-Tortoniano inferiore), e a tetto “*Pietra Forte*”. Queste formazioni sono riferite ad un intervallo cronostratigrafico incluso tra il Serravalliano (14,7 M.A.) e il Messiniano (7,1 M.A.) (Cherchi, 1971).

Calcari di Cagliari, calcari ed arenarie marnose

Come già introdotto, nelle colline di Cagliari affiora una successione prevalentemente carbonatica (calcari e arenarie marnose), nota in letteratura con il nome di “*Calcari di Cagliari*” *Auct.* (Gandolfi & Porcu, 1967; Cherchi, 1974; Cherchi & Montadert, 1984), costituita alla base da calcari marnosi (“*Pietra Cantone*” *Auct.*) sormontati da calcareniti (“*Tramezzario*” *Auct.*) e da calcari bioermali (“*Pietra Forte*” *Auct.*, detta anche “*Calcare di Bonaria*” *Auct.*).

La “*Pietra Cantone*” è una calcarenite arenacea attribuita al Tortoniano-Messiniano inferiore ed è posizionata tra le “Arenarie di Pirri” e il “*Tramezzario*”, è di colore beige-giallo, scarsamente compatta e generalmente senza stratificazione.

Presenta una percentuale di CaCO₃ oscillante tra il 75 % e l’80 % (Gandolfi & Porcu, 1967).

Questo litotipo è caratterizzato da una uniformità litologica e da una stabilità delle quantità di bentonici che appaiono simili alle popolazioni attualmente viventi nel circalitorale e nel batiale. Per la parte sommitale è stata ipotizzata una interruzione di sedimentazione ed il passaggio all’unità successiva avviene con un brusco cambiamento litologico.

Il nome (*Pietra da Cantoni*) di derivazione popolare, gli viene dall’essere stata in passato materiale di largo impiego nell’edilizia. La componente argillosa rende la roccia molto tenera, igroscopica e degradabile all’aria, la componente calcarea è spesso costituita da un impasto di foraminiferi, mentre la frazione arenacea è formata da piccoli frammenti organici calcarei, a volte silicei.

Nei numerosi affioramenti è presente quasi sempre una stratificazione in banchi di 30-40 cm e in svariati punti si osservano strutture da bioturbazioni. I resti fossili sono abbondanti, sia come macro che come microfauna.

La “*Pietra Cantone*” *Auct.* è costituita da calcari marnoso-arenacei giallastri mal stratificati, che poggiano sulle arenarie di Pirri con facies di passaggio marnoso-arenacee. Affiora nel Colle di San Michele e a Capo S. Elia dove raggiunge i suoi massimi spessori (circa 50 m). L’ambiente deposizionale, basato sulle macrofaune e sui coralli isolati, indica una profondità di circa 60-80 m (Leone *et alii*, 1992).

Il contenuto paleontologico è molto abbondante ed è costituito da foraminiferi planctonici e bentonici, da bivalvi, gasteropodi, echinidi, crostacei etc., in questa formazione sono stati rinvenuti i resti di un coccodrillo (*Tomistoma Calaritanus*). I foraminiferi planctonici permettono di attribuire questa unità litostratigrafica al Tortoniano-Messiniano inferiore (Pecorini & Pomesano Cherchi, 1969; Cherchi, 1974; Cherchi & Montadert, 1982; 1984).

Al di sopra della “*Pietra Cantone*” *Auct.*, tramite una discontinuità riferibile ad una fase erosiva, poggia il “*Tramezzario*” *Auct.*, rappresentato da biocalcareni talora marnose.

Presenta una percentuale di CaCO_3 oscillante tra l’84 e l’88 % (Gandolfi & Porcu, 1967).

La parte basale del “*Tramezzario*” *Auct.* è caratterizzata da *slumping*, faglie sinsedimentarie, superfici di erosione e brecce intraformazionali. Il contatto con l’unità sottostante è netto e marcato dal cambiamento delle biocenosi, le quali indicano per il “*Tramezzario*” *Auct.* una batimetria di sedimentazione non superiore a 40 m, che tende progressivamente a diminuire verso l’alto della successione (Leone *et alii*, 1992).

Gli spessori sono molto variabili, da 0 a 40 m. Il contatto con la sovrastante unità (“*Pietra Forte*” *Auct.*) è individuato da una netta discontinuità ancora riferibile ad una superficie erosiva, marcata anche dalla presenza di clasti di “*Pietra Cantone*” *Auct.* nella parte basale della “*Pietra Forte*” *Auct.*

La “*Pietra Forte*” *Auct.* (indicata anche come “*Calcare di Bonaria*”), di età tortoniano-messiniana, è rappresentata da calcari, talvolta massivi e con caratteri generalmente bioermali e talvolta biostromali.

L’ambiente deposizionale può essere ricondotto a condizioni litorali e infralitorali, con elevata energia e paleobatimetria inferiore a 30 m. (Leone *et alii*, 1992). La “*Pietra Forte*” è un calcare massivo molto compatto bianco-grigiastro di scogliera, tipicamente organogeno spesso bioclastico con resti di molluschi, briozoi e coralli. Presenta valori di CaCO_3 raggiungenti una percentuale di circa il 90 % (Gandolfi & Porcu, 1967).

L’ambiente deposizionale per la porzione medio-bassa della sequenza può essere riferito alla zona circalitorale. Presenta zone di cataclasi localmente ricementate (“*buttonalla*”). La “*Pietra Forte*” è molto compatta, talvolta incarsita, possiede una resistenza meccanica media (500 Kg / cm^2) ed è una roccia permeabile per fratturazione e carsismo (Barroccu *et alii*, 1979; Gandolfi & Porcu, 1967; Pala & Siriu, 1998). Le caratteristiche di consistenza e tenacia hanno fatto di questo litotipo il materiale più usato per le costruzioni monumentali della città di Cagliari.

La “*Pietra Forte Auct.*” è caratterizzata da discordanze intraformazionali e breccie miste a paleosuoli, che testimoniano l’instabilità tettonica del bacino sedimentario. Questa unità raggiunge lo spessore massimo (60 m) nel promontorio di S. Elia.

Il contenuto fossilifero è molto abbondante, questo presenta abbondanti resti organogeni a molluschi ed alghe (litotamni) e a grossi foraminiferi (*Amphistegina*, *Miogypsina*, *Elphiudium*, etc.) e colonie di briozoi (Barroccu *et alii*, 1979; Gandolfi & Porcu, 1967; Pala & Siriu, 1998).

Comunque, il contenuto fossilifero non consente accurate attribuzioni stratigrafiche; nondimeno, l’età della “*Pietra Forte*”, sulla base della posizione stratigrafica e delle faune, è stata riferita al Messiniano (Cherchi, 1985; Leone *et alii.*, 1992; Assorgia *et alii.*, 1997).

Arenarie marnose, sabbie, calcareniti sublitorali:

Nella Sardegna meridionale il contatto netto tra le Argille di Fangario e la sovrastante successione arenacea (Arenarie di Pirri: Pecorini & Pomesano Cherchi, 1969), marca il cambiamento di facies da ambienti pelagici a quelli litorali (e localmente fluvio-deltizi), sottolineato anche dalle associazioni paleontologiche della formazione arenacea (soprattutto foraminiferi bentonici).

Una breve lacuna di sedimentazione (Pecorini & Pomesano Cherchi, 1969; Spano, 1989; 1990) caratterizza questo cambiamento, testimoniato dalla mancanza di continuità nell’evoluzione delle forme planctoniche e dalla presenza di clasti marnoso-argillosi serravalliani (Argille di Fangario) rimaneggiati nelle sovrastanti Arenarie di Pirri. Questi depositi, costituiti principalmente da banchi arenacei ben cementati, ai quali si alternano sabbie quasi incoerenti e lenti di conglomerati a clasti di rocce paleozoiche, affiorano soprattutto a Cagliari anche nel quartiere di Villanova (dove è situato l’Exma’) e dintorni (Pirri, Sestu, Quartu, etc.). L’età della formazione, spesso fino a 200 m, è riferibile interamente al Serravalliano (Cherchi, 1974; 1985; Leone *et alii*, 1992).

Nella zona del quartiere di Villanova a Cagliari, dove si trova il complesso monumentale dell’Exma’ (che è stato uno degli oggetti di studio), si rinvengono, come si può osservare nella carta geologico-tecnica (Figura 2.1), soprattutto “Arenarie di Pirri”, dell’Elveziano-Tortoniano inferiore; queste sono costituite da un’alternanza di sabbie e arenarie ed elementi di quarzo, feldspato e mica, subordinatamente di calcite clastica a cemento calcareo, di colore grigio-verdastro, sono localmente fossilifere (lamellibranchi, ostree, pettinidi, echinidi etc.). Le “Arenarie di Pirri” sono permeabili per porosità e localmente per fratturazione e costituiscono un importante acquifero.

Nella zona del quartiere di Castello, dove si trova la Torre di San Pancrazio, anch'essa oggetto di studio, si rinviene invece la "*Pietra Forte*".

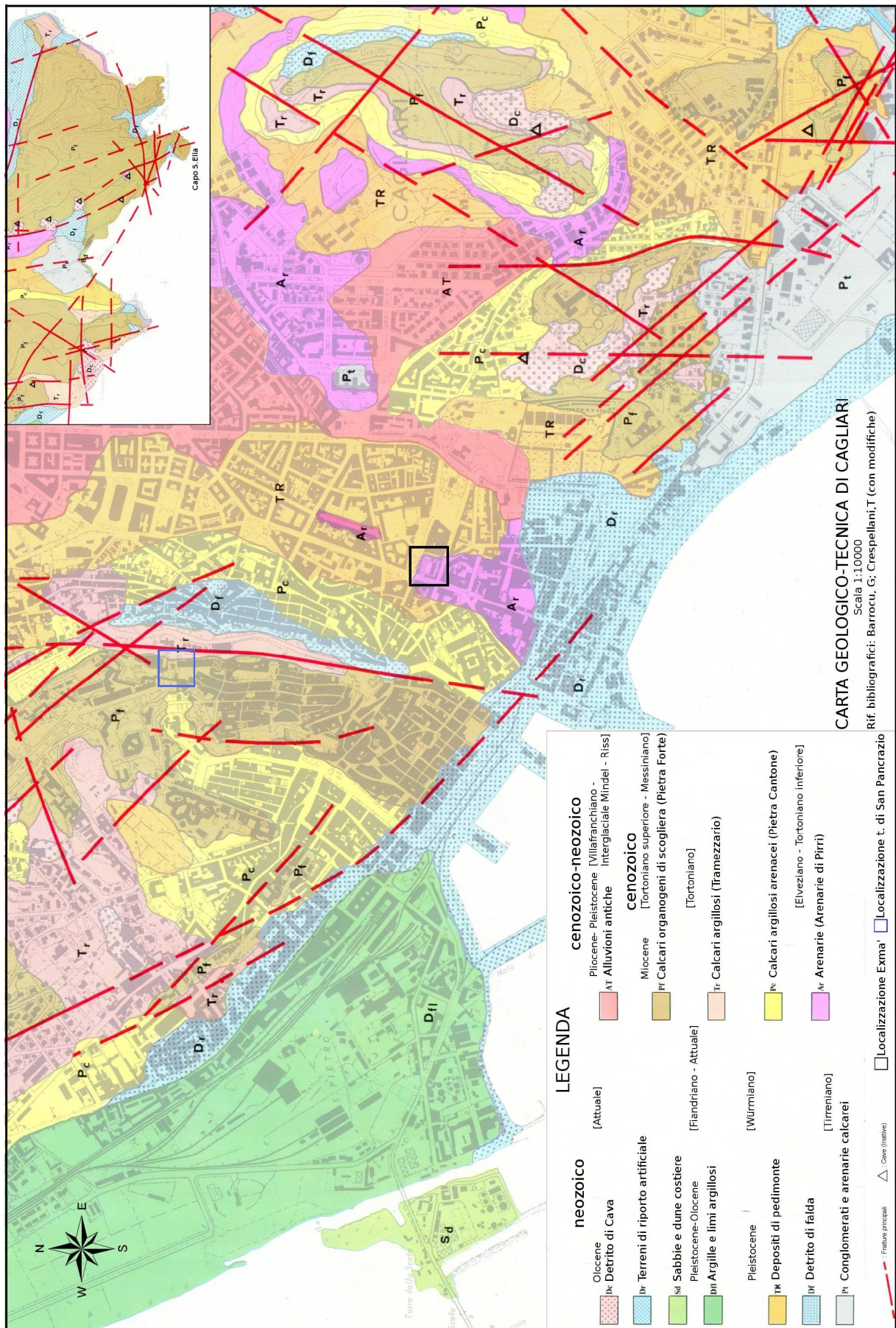


Figura 2.1: Carta geologico-tecnica dell'area di Cagliari (da Barrocu *et alii*, 1979, con modifiche).

2.1.1 CENNI SUI PROCESSI DI DEGRADO DELLE ROCCE CARBONATICHE

Le rocce carbonatiche sono materiali che possono avere diversi gradi di compattezza o porosità. I calcari compatti (e.g. *Pietra Forte*), di solito, non vanno incontro a gravi problemi di degrado in quanto tendono a deteriorarsi solo nelle superfici esposte agli agenti atmosferici e tendono ad essere soggetti a fenomeni di natura esclusivamente chimica. Invece, i calcari porosi (e.g. *Pietra Cantone* e *Tramezzario*), che spesso sono caratterizzati da pori comunicanti, possono subire degrado sia nelle superfici esposte sia nelle loro parti interne, con fenomeni di disgregazione che possono essere di natura sia chimica che fisica. Inoltre, i calcari porosi sono particolarmente sensibili al deterioramento meccanico provocato dagli eventi meteorici.

La microstruttura delle rocce calcaree è funzione di vari parametri, come il volume percentuale dei pori, la loro distribuzione dimensionale e la loro forma, il loro grado di interconnessione e la loro apertura. Tutti questi fattori influenzano la quantità d'acqua e di inquinanti che possono concentrarsi all'interno delle strutture, la profondità di penetrazione dei liquidi, la velocità di assorbimento e di evaporazione, nonché la temperatura di congelamento dell'acqua (Sanna, 2012).

Nelle rocce carbonatiche da costruzione, come i calcari della serie oligomiocenica di Cagliari, si possono instaurare delle interazioni materiale-ambiente di diversa natura: interazioni di origine chimica, fisica o alterazioni di tipo biologico. La principale sostanza aggressiva che causa degrado è sicuramente l'acqua, ma hanno una responsabilità notevole anche alcuni ossidi (come SO_2 , CO_2 , NO_x) che derivano da inquinamento industriale, traffico veicolare e presenza antropica. Anche i sali (cloruri, solfati, etc.) possono essere causa di degrado. Questi possono avere origine negli stessi terreni dove viene edificata la struttura o possono anche essere già presenti nella roccia e nei materiali da costruzione. Spesso hanno, come mezzo di trasporto, l'aerosol marino.

Per quanto riguarda l'acqua, come elemento che provoca degrado, questa non è solo un veicolo attraverso il quale possono penetrare, all'interno di un materiale carbonatico poroso, le sostanze aggressive provenienti da ambienti inquinati, come gli ossidi (che a contatto con l'acqua si trasformano in acidi) o come i sali, ma è anche una sostanza estremamente pericolosa per le sue proprietà solventi e per il sensibile aumento di volume che subisce nella transizione liquido-solido. L'acqua è molto influente nei processi di degrado anche perché

controlla le condizioni di trasporto, di deposito e di contatto tra le sostanze inquinanti e i materiali da costruzione.

L'acqua presente nei materiali lapidei di natura carbonatica può avere diverse origini, può provenire dall'atmosfera o dal suolo. L'acqua atmosferica proveniente dalle piogge induce cause chimiche o fisiche di degrado, rappresentate ad esempio da formazione di ghiaccio e cristallizzazione dei sali solubili che inducono un dilavamento dei materiali costituenti e delle eventuali malte; l'acqua proveniente dal suolo induce cause chimiche di degrado, come la formazione di gesso.

Nei materiali lapidei carbonatici che costituiscono le murature (come nella maggior parte delle strutture monumentali di Cagliari), l'umidità induce vari fenomeni di degrado derivanti da fattori atmosferici, da fenomeni di gelo-disgelo e da cristallizzazione salina che a sua volta si manifesta come efflorescenze o subflorescenze (Sanna, 2012).

Le piogge acide hanno un ruolo importante nei processi di degrado dei materiali lapidei carbonatici da costruzione. Sono causate dall'inquinamento atmosferico, principalmente da un aumento nell'anidride carbonica presente, degli ossidi di zolfo e degli ossidi di azoto che determinano un abbassamento del pH (acidificazione) delle precipitazioni. Le reazioni che portano a questa acidificazione sono le seguenti:

$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ (l'anidride carbonica presente nell'atmosfera reagisce con l'acqua producendo acido carbonico);

$\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$ (l'anidride solforica idrolizzata produce acido solforico);

$\text{N}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{HNO}_3$ (per idrolisi, l'anidride nitrica origina due molecole di acido nitrico).

Gli acidi trasportati dalle piogge interagiscono soprattutto con i materiali di natura calcarea. La presenza degli ossidi di zolfo nell'atmosfera è responsabile, soprattutto sulle superfici dei lapidei calcarei, della formazione delle cosiddette "croste nere" (Figura 2.2 a) il cui componente principale è il solfato di calcio (gesso). Le acque che contengono anidride solforosa trasformano i carbonati in gesso:

$\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$, l'acido solforico rappresenta il prodotto finale delle trasformazioni dell'anidride solforosa ($\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$). Le croste nere che sono la manifestazione visibile di questa reazione, si formano per inglobamento di particelle carboniose atmosferiche (inquinamento) tra i cristalli di gesso che

si formano e tra i cristalli di calcite di ricristallizzazione (carbonato di calcio precedentemente disciolto che ricristallizza). Le croste nere, sviluppandosi all'interno delle fessure, sono in grado, a causa dell'aumento di volume dei cristalli, di provocare sfaldamento e distacco di materiale lapideo. Il colore scuro comporta anche un maggiore assorbimento delle radiazioni solari con conseguente aumento del deterioramento provocato da espansione differenziale della crosta rispetto al materiale sottostante e circostante.

Il degrado più frequente nei materiali lapidei calcarei di Cagliari è quello prodotto dai sali. I sali presenti all'interno dei materiali costruttivi possono derivare dalla risalita capillare dell'acqua proveniente dal terreno, dalla reazione degli inquinanti atmosferici, dal metabolismo di alcuni microorganismi e, come detto sopra, possono anche essere già presenti nella normale composizione dei materiali da costruzione. Quando i sali cristallizzano al di fuori dei pori e solo sulla superficie dei manufatti, sulla muratura compaiono le cosiddette efflorescenze. Se i sali cristallizzano dentro i pori, si formano le subflorescenze che inducono sollecitazioni di tipo meccanico anche sulle pareti dei pori. I sali solubili sono il principale fattore che innesca il degrado di tipo alveolare (gli alveoli sono cavità aventi forme e dimensioni variabili) nei lapidei calcarei porosi (Figura 2.2 b). Il degrado che ne deriva è la conseguenza dell'azione esercitata dalla pressione di cristallizzazione dei sali all'interno dei pori del materiale lapideo. Infatti, le soluzioni saline tendono, con l'evaporazione del solvente, a cristallizzarsi con conseguente aumento di volume. I pori del materiale lapideo subiscono pressioni superiori alle capacità di resistenza del materiale e si sfaldano (Bosco, 2009).

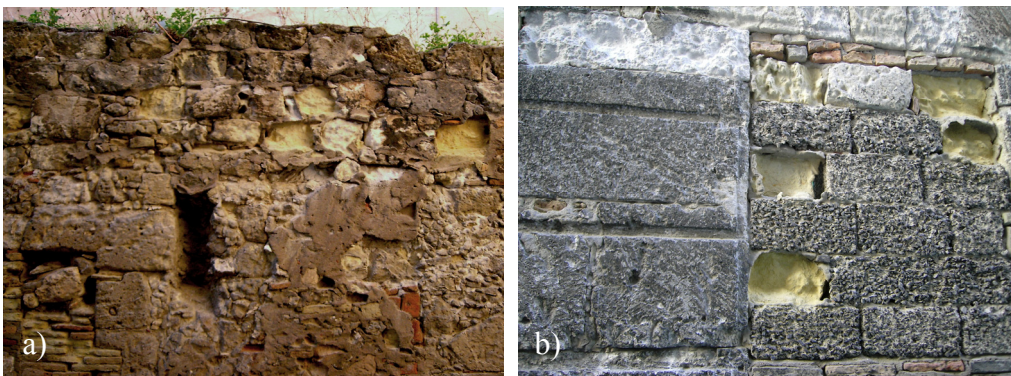


Figura 2.2: Alveolizzazione e croste nere (a) e stadio avanzato di alveolizzazione (b) nelle strutture murarie del quartiere di Castello a Cagliari.

I manufatti che subiscono maggiormente questo tipo di disgregazione sono quelli frequentemente esposti a forti venti, infatti il vento favorisce l'evaporazione dell'acqua e quindi la deposizione dei sali solubili.

Anche i cicli di gelo e disgelo possono provocare degrado, sono tipici di zone geografiche fredde ma occasionalmente possono agire anche nelle zone temperate come la Sardegna, provocando danni derivanti dalle sollecitazioni locali indotte dall'aumento di volume che avviene nella transizione da liquido a solido dell'acqua. Questi effetti vengono accentuati indirettamente dall'inquinamento atmosferico che con l'erosione chimica fa aumentare le superfici disponibili per il processo. La gelività (caratteristica di alcuni materiali di disgregarsi per azione del gelo) di una roccia calcarea dipende in larga parte dalle dimensioni dei pori che costituiscono il suo sistema poroso. In generale, le rocce con pori più piccoli sono più gelive di quelle con pori più grandi.

Un ultimo ma non meno importante fattore di degrado che può colpire i lapidei calcarei è l'alterazione biologica prodotta da alghe, funghi, licheni e muschi che proliferano con l'umidità presente nel materiale. Questi organismi estraggono ioni dal materiale lapideo per mezzo degli acidi che producono con il metabolismo. Spesso i licheni, che possono colonizzare la superficie di molte rocce anche calcaree, svolgono comunque un effetto protettivo delle superfici dei materiali da costruzione.

2.2 SPERIMENTAZIONE IN LABORATORIO

Introduzione

Questa fase del lavoro è stata dedicata alle analisi di laboratorio atte alla descrizione e caratterizzazione dei campioni relativa alle tre tipologie dei calcari oligo-miocenici di Cagliari, utilizzati quali materiali costruttivi delle strutture monumentali in studio.

Oltre alla descrizione macroscopica dei campioni, in questa sezione vengono illustrati i risultati delle misure ultrasoniche di laboratorio e dell'analisi comparata tra misure ultrasoniche e contenuto in carbonati, determinato tramite le calcimetrie. A completamento di questa fase dello studio, sono stati effettuati anche i diffrattogrammi, per individuare le fasi mineralogiche presenti nei campioni. Inoltre sono state analizzate le sezioni sottili, realizzate per studiare le caratteristiche dei campioni a livello microscopico. Infine, vengono illustrate le misure di densità effettuate mediante picnometro ad elio e le misure di assorbimento in acqua. Tutte le misure e le analisi sono state effettuate non solo per avere un quadro completo delle caratteristiche fisiche e tessiturali dei campioni, ma anche al fine di acquisire elementi di conoscenza indispensabili per comprendere meglio la relazione tra tali caratteristiche e la propagazione del segnale ultrasonico.

2.2.1 Descrizione macroscopica dei campioni

I campioni analizzati fanno parte di una campionatura effettuata tra il 2010 e il 2012 (campioni PC1a1, PC1a2, PC2a, PC2b1, PC2b2, PC3a, Tr1b1, Tr1b2, Tr1c, Tr1a, Trx1, Trx2, PF1ga, PF2ga, PF1a1, PF1a2) e di una precedente campionatura effettuata nel 2008 (campioni PC4, Tr3 e PF3). Tali campioni sono stati tagliati in forma prismatica da blocchi estratti da vari affioramenti. La preparazione dei campioni è stata realizzata seguendo la norma “Normal 22/86” (Figura 2.3). L’elenco dei campioni utilizzati per le prove di laboratorio, la loro provenienza e l’indicazione del litotipo sono riportati in tabella 2.1.

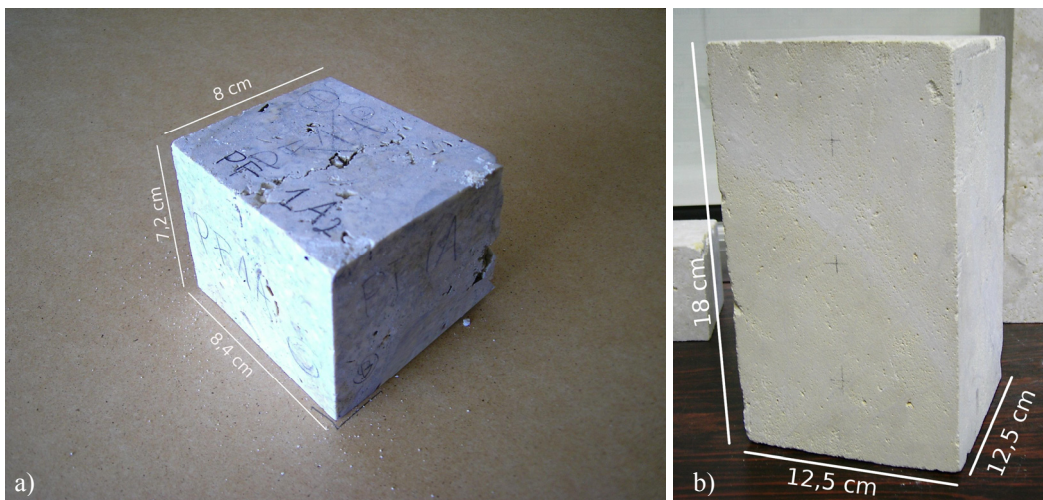


Figura 2.3: (a) campione PF1a2 e (b) Tr3.

I campioni PC1a1 e PC1a2 (*Pietra Cantone*) sono calcari marnoso-arenacei di colore giallo avana, omogenei ma con screziature di colore leggermente più scuro. Presentano una grana fine, con una debole porzione arenacea.

Il campione PC2a (*Pietra Cantone*) è un calcare marnoso-arenaceo simile ai precedenti, ma è di colore giallo avana omogeneo leggermente più chiaro e non presenta venature. Presenta diversi resti di macrofauna, visibili nelle varie facce. Il campione è compatto.

I campioni PC2b1 e PC2b2 (*Pietra Cantone*) sono calcari marnoso-arenacei di colore giallo avana omogeneo. Essi presentano resti di macrofauna, visibili nelle varie facce.

Il campione PC3a (*Pietra Cantone*) è un calcare marnoso-arenaceo, presenta un colore giallo avana omogeneo.

Il campione PC4 (*Pietra Cantone*), è un calcare marnoso-arenaceo giallastro-giallo avana, ha aspetto opaco. Si presenta moderatamente compatto, di grana fine con una certa porzione arenacea. Sono presenti venature o chiazze cromaticamente variabili e si notano resti di macrofauna.

I campioni Tr1b1 e Tr1b2 (*Tramezzario*) sono calcari debolmente marnosi bianco avorio. Hanno ambedue un aspetto farinoso dato dalla frazione fine che si accompagna ai frammenti organogeni. Si presentano abbastanza compatti ed uniformi nelle loro caratteristiche fisiche, hanno clasti calcarei minuti. Nei campioni si notano localmente frammenti di macrofauna.

Il campione Tr1c (*Tramezzario*) è un calcare debolmente marnoso bianco. Si presenta abbastanza compatto, ha un aspetto leggermente farinoso con pochi frammenti organogeni.

Il campione Tr1a (*Tramezzario*) è un calcare debolmente marnoso bianco. Si presenta abbastanza compatto ed uniforme, ha un aspetto leggermente farinoso con diversi frammenti organogeni.

I campioni Trx1 e Trx2 (*Tramezzario*) sono calcari debolmente marnosi bianco avorio molto compatti ed uniformi. Hanno ambedue un aspetto leggermente farinoso e in essi si notano pochi frammenti organogeni.

Il campione Tr3 (*Tramezzario*), è un calcare debolmente marnoso bianco avorio. Si presenta abbastanza compatto con clasti calcarei minuti. Ha un aspetto farinoso dato dalla frazione fine che si accompagna ai frammenti organogeni.

I campioni PF1ga e PF2ga (*Pietra Forte*) sono calcari organogeni di scogliera, biancastri con screziature grigie. Si presentano molto compatti, duri ed uniformi, sono di grana grossa con abbondanti resti organogeni.

I campioni PF1a1 e PF1a2 (*Pietra Forte*) sono calcari organogeni di scogliera, biancastri con screziature giallognole e grigie. Si presentano molto compatti a grana grossa e presentano abbondanti resti organogeni.

Il campione PF3 (*Pietra Forte*), è un calcare organogeno di scogliera, biancastro e con screziature e plaghe giallognole e grigiastre omogenee e regolarmente distribuite. Si presenta a grana grossa con abbondanti resti organogeni.

<i>Sigla campione</i>	<i>Provenienza</i>	<i>Litotipo</i>	<i>Misure (cm)</i>	<i>Tipologia</i>
PC1a1	Via della Pineta	<i>Pietra Cantone</i>	7,7×7,4×7,3	calcare marnoso-arenaceo
PC1a2	Via della Pineta	<i>Pietra Cantone</i>	7,5×7,3×7,2	calcare marnoso-arenaceo
PC2a	Via dei Punici	<i>Pietra Cantone</i>	8,3×8,2×7,2	calcare marnoso-arenaceo
PC2b1	Via dei Punici	<i>Pietra Cantone</i>	8,2×7×7	calcare marnoso-arenaceo
PC2b2	Via dei Punici	<i>Pietra Cantone</i>	7,5×7×7	calcare marnoso-arenaceo
PC3a	Viale Buon Cammino	<i>Pietra Cantone</i>	8,2×7,9×7,8	calcare marnoso-arenaceo
Tr1b1	Viale Buon Cammino	<i>Tramezzario</i>	8,7×7,2×7,2	calcare debolmente marnoso
Tr1b2	Viale Buon Cammino	<i>Tramezzario</i>	8,5×7,5×7,4	calcare debolmente marnoso
Tr1c	Viale Buon Cammino	<i>Tramezzario</i>	9,2×8,5×7	calcare debolmente marnoso
Tr1a	Via Is Maglias	<i>Tramezzario</i>	8,4×7,1×7	calcare debolmente marnoso
Trx1	Via Castelli	<i>Tramezzario</i>	9,1×7,2×7	calcare debolmente marnoso
Trx2	Via Castelli	<i>Tramezzario</i>	9,6×7,6×7	calcare debolmente marnoso
PF1ga	Via della Pineta	<i>Pietra Forte</i>	24×12×12	calcare organogeno di scogliera
PF2ga	Via della Pineta	<i>Pietra Forte</i>	24×12×12	calcare organogeno di scogliera
PF1a1	Viale Buon Cammino	<i>Pietra Forte</i>	8,5×8×7	calcare organogeno di scogliera
PF1a2	Viale Buon Cammino	<i>Pietra Forte</i>	8,4×8×7,2	calcare organogeno di scogliera
PC4	Via Dexart	<i>Pietra Cantone</i>	23×12,5×12,5	calcare marnoso-arenaceo
Tr3	Cala Fighera	<i>Tramezzario</i>	18×12,5×12,5	calcare debolmente marnoso
PF3	Sa Spiaggiola	<i>Pietra Forte</i>	25×12,5×12,5	calcare organogeno di scogliera

Tabella 2.1: Provenienza e tipologia dei campioni analizzati.

2.2.2 Misure ultrasoniche

Questa fase del lavoro riguarda le analisi ultrasoniche di laboratorio. Le misure di velocità ultrasonica sono state eseguite su campioni prelevati in diversi affioramenti del distretto di Cagliari, opportunamente preparati (Normal 22/86). I blocchi prelevati dagli affioramenti (Figura 2.4), sono stati tagliati in laboratorio mediante taglierina elettrica, in modo tale da ottenere dei campioni prismatici aventi dimensioni adeguate (Normal 22/86).



Figura 2.4: Campione di *Tramezzario* (Tr3) prelevato dagli affioramenti in località Cala Fighera.

I campioni sono stati scelti dopo attenta valutazione, in modo che fossero rappresentativi di rocce sane e prive di alterazioni. In questo modo, i valori di velocità ultrasonica determinati in laboratorio, hanno rappresentato un riferimento atto a valutare i valori di velocità sugli stessi materiali in opera.

Per le misure ultrasoniche è stato utilizzato lo strumento P.U.N.D.I.T. riportato in figura 2.5, le cui caratteristiche tecniche sono riassunte in tabella 2.2. I trasduttori utilizzati avevano frequenza di 24, 54 ed 82 kHz. Come materiale di accoppiamento è stata utilizzata una sottile pellicola di silicone, prodotta dalla *CNS Electronics* di Londra.

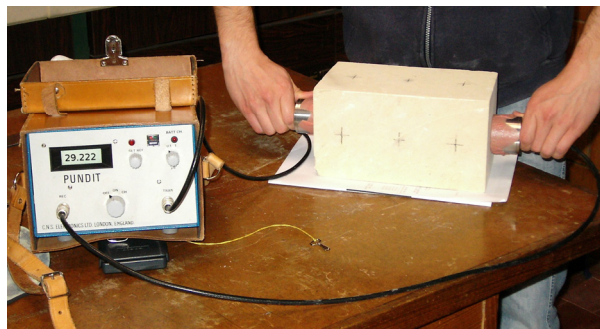


Figura 2.5: Strumento P.U.N.D.I.T. prodotto dalla *CNS Electronics* Londra, durante una prova di laboratorio.

Tipo	Monocanale
Accuratezza	$\pm 1 \%$
Range tempi di transito	da 0.1 a 9999 μsec
Alimentazione	Batteria / corrente alternata
Autonomia batteria	9 h

Tabella 2.2: Caratteristiche tecniche del P.U.N.D.I.T.

Dopo avere effettuato tutte le procedure previste dalle norme (Normal 22/86, 1987, Misura della velocità di propagazione del suono) e ottenuto i tempi di transito del segnale ultrasonico, sono state calcolate le velocità medie tramite la formula $V = l/t$ (dove V = velocità media; l = distanza tra emettitore e ricevitore; t = tempo di transito dell'onda longitudinale).

Le misure sono state effettuate prima su campioni asciutti e successivamente su campioni saturi al fine di calcolare la porosità anche per via dinamica. Nelle misure di laboratorio sono state applicate tre differenti modalità di acquisizione (Normal 22/86), (Figura 1.3, paragrafo 1.3): acquisizione in trasmissione diretta o “per trasparenza”, acquisizione in trasmissione indiretta o “di superficie” e acquisizione in trasmissione semi-diretta.

Misure ultrasoniche effettuate su campioni asciutti

I trend dei valori medi delle velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici longitudinali (V_p), rilevate nei campioni di *Pietra Cantone* secondo le diverse modalità di trasmissione, utilizzando trasduttori da 24 kHz, 54 kHz e 82 kHz sono rappresentati rispettivamente nella figura 2.6 (a,b,c).

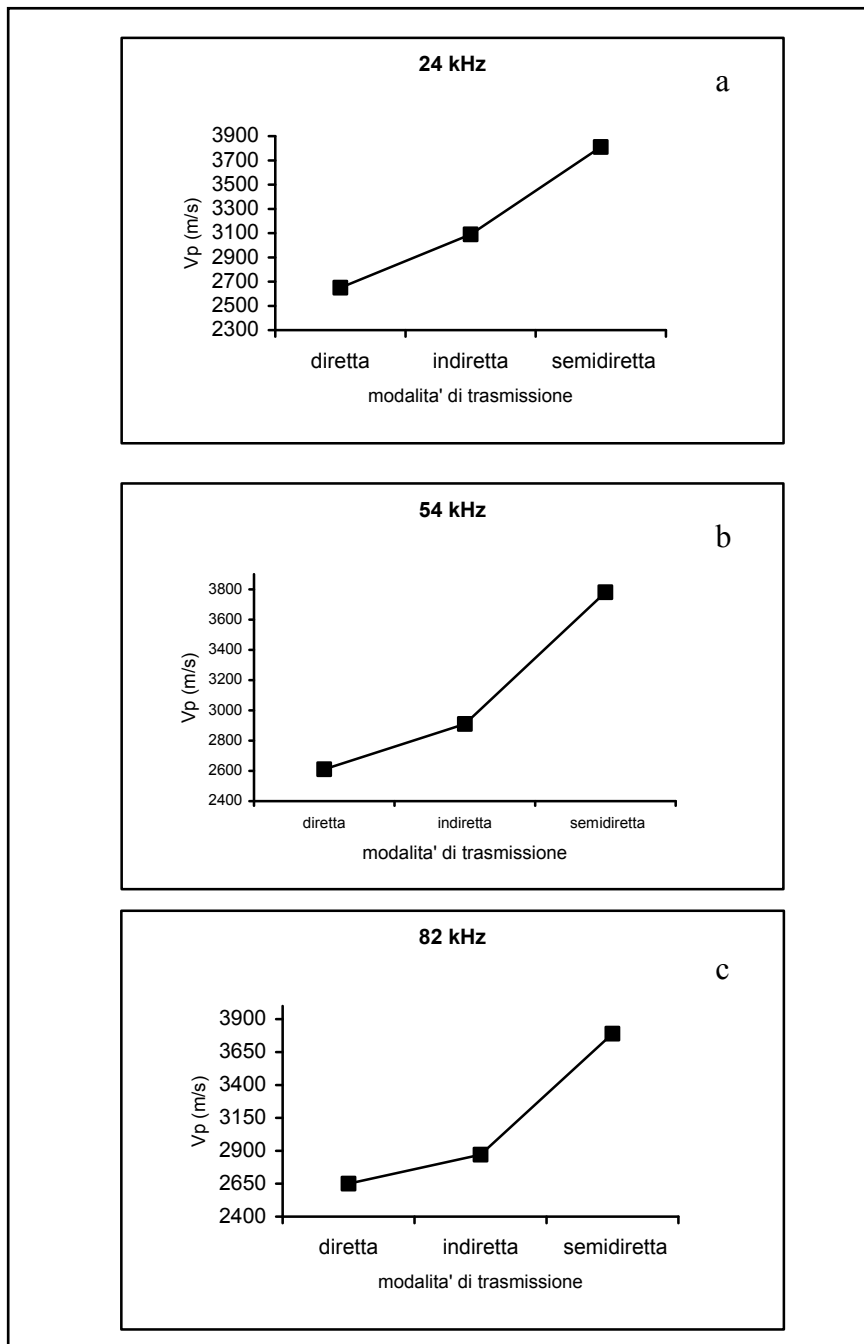


Figura 2.6: Diagrammi di variazione della velocità V_p in funzione della modalità di trasmissione per i campioni di *Pietra Cantone*, utilizzando trasduttori da 24 kHz (a), 54 kHz (b), 82 kHz (c).

I trend dei valori medi delle velocità ultrasoniche rilevate nei campioni di *Tramezzario* allo stato secco, secondo le diverse modalità di trasmissione, utilizzando trasduttori da 24 kHz, 54 kHz e 82 kHz sono rappresentati rispettivamente nella figura 2.7 (a,b,c).

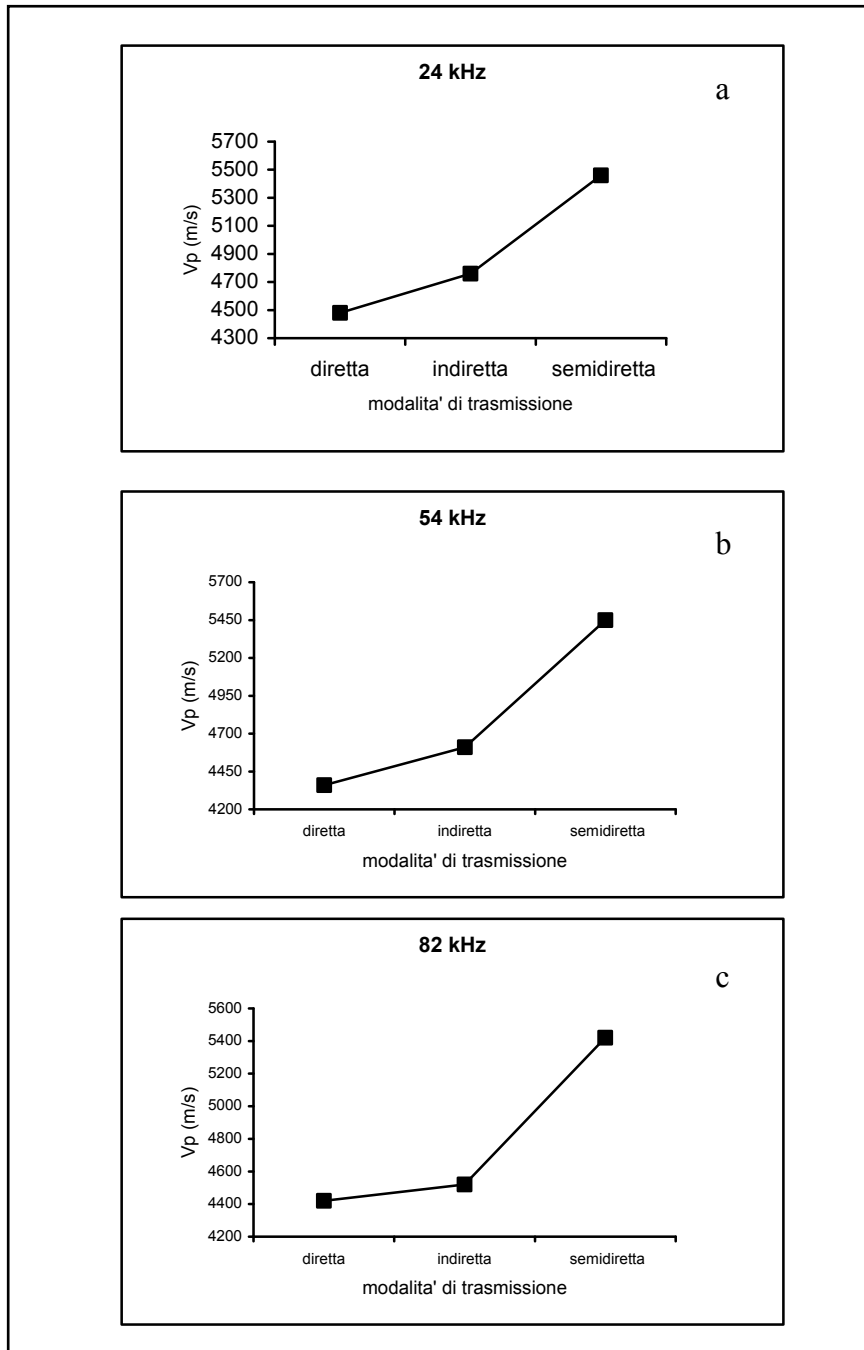


Figura 2.7: Diagrammi di variazione della velocità V_p in funzione della modalità di trasmissione per i campioni di *Tramezzario*, utilizzando trasduttori da 24 kHz (a), 54 kHz (b), 82 kHz (c).

I trend dei valori medi delle velocità ultrasoniche rilevate nei campioni di *Pietra Forte* allo stato secco, secondo le diverse modalità di trasmissione, utilizzando trasduttori da 24 kHz, 54 kHz e 82 kHz sono rappresentati rispettivamente nella figura 2.8 (a,b,c).

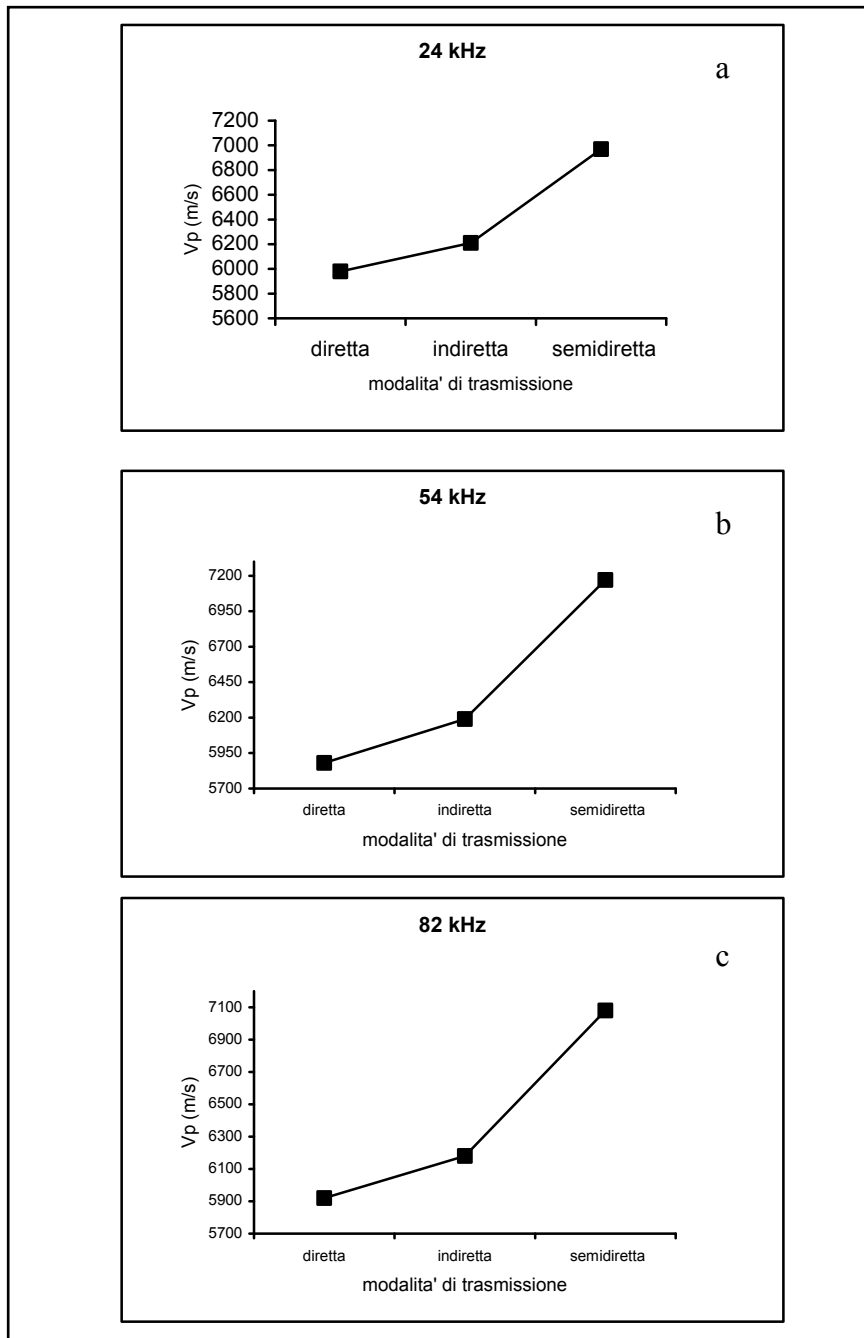


Figura 2.8: Diagrammi di variazione della velocità V_p in funzione della modalità di trasmissione per i campioni di *Pietra Forte*, utilizzando trasduttori da 24 kHz (a), 54 kHz (b), 82 kHz (c).

Le medie di tutte le misure effettuate sui campioni dei diversi litotipi, in modalità diretta, semidiretta e indiretta, utilizzando trasduttori a diverse frequenze, sono state rappresentate schematicamente mediante il grafico in figura 2.9.

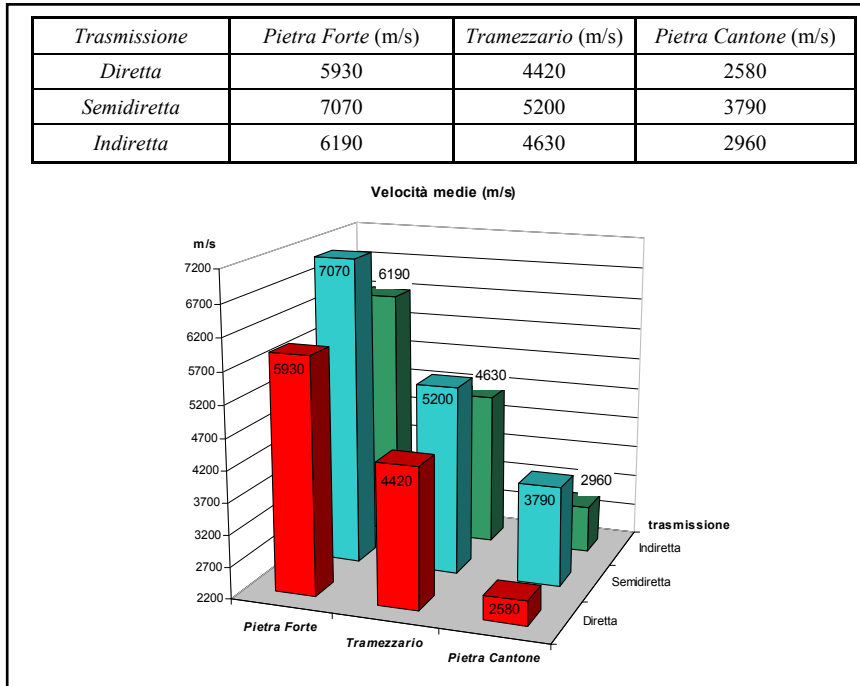


Figura 2.9: Medie delle velocità ultrasoniche di tutte le misure (m/s).

Come si può notare nel grafico in figura 2.9, le velocità ultrasoniche calcolate in modalità semidiretta e indiretta risultano più elevate di quelle calcolate in modalità diretta. Infatti, nella modalità diretta, il percorso dell'impulso ultrasonico (distanza trasmettitore-ricevitore) è più lungo rispetto a quello che viene effettuato nelle altre due modalità. Pertanto, vi sono maggiori possibilità che il segnale ultrasonico incontri discontinuità e difetti lungo il percorso. Al fine di facilitare l'analisi comparata dei valori di velocità tra le rocce carbonatiche in studio, calcolati con i dati acquisiti nella modalità diretta, si è realizzata una rappresentazione grafica (Figura 2.10) in cui vengono evidenziati i *range* di variabilità delle velocità per ciascun litotipo.

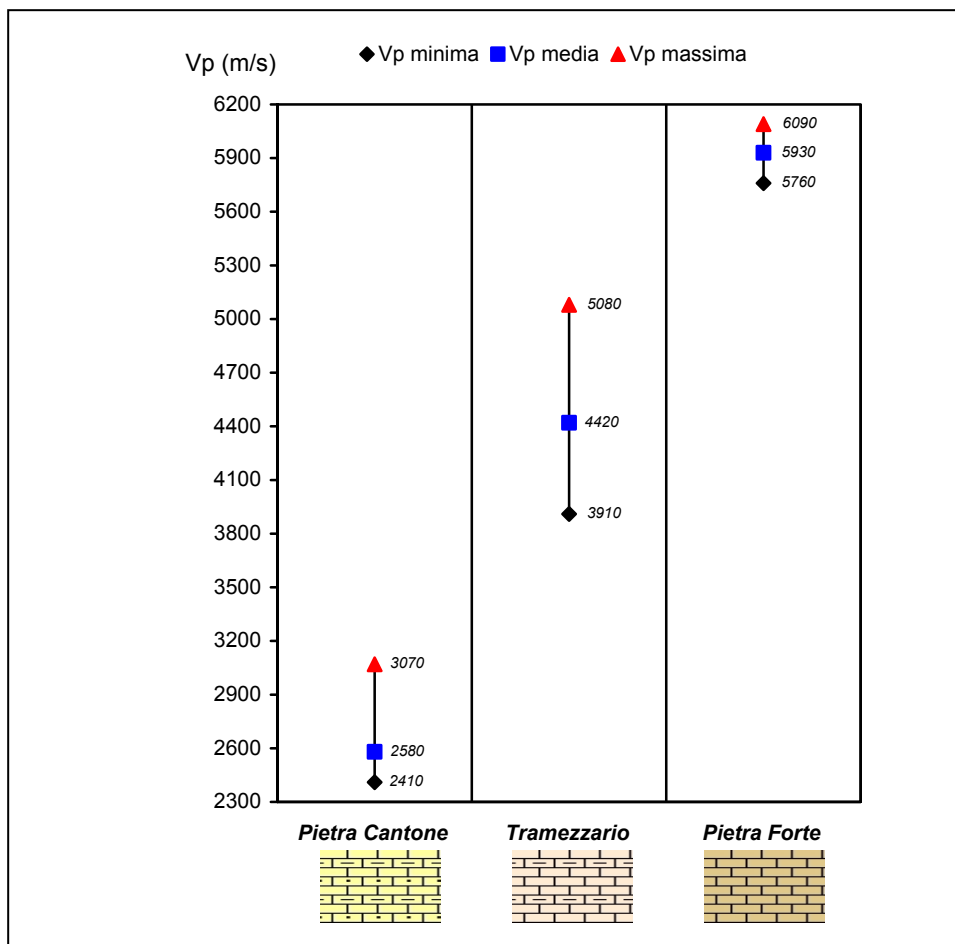


Figura 2.10: Diagramma delle velocità ultrasoniche V_p ottenute dai dati acquisiti in modalità diretta per i tre litotipi analizzati.

Analoghe rappresentazioni per le modalità semidiretta e indiretta sono rappresentate, rispettivamente, nelle figure 2.11 e 2.12.

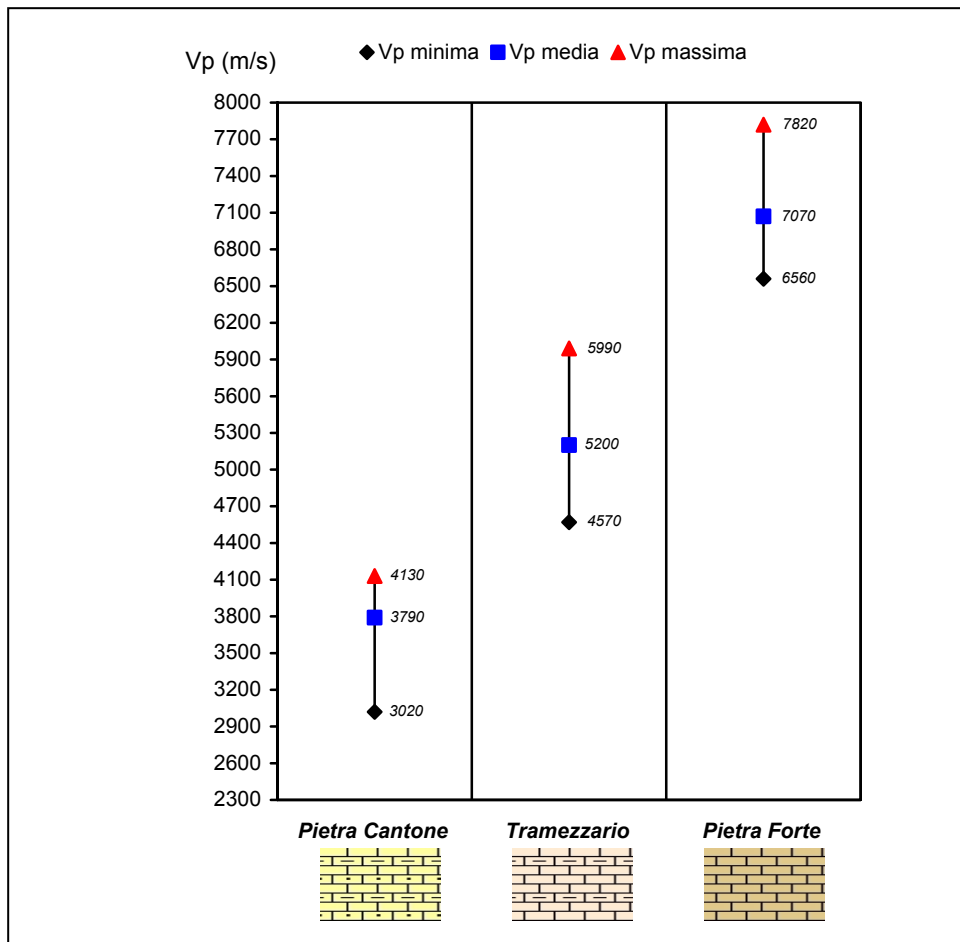


Figura 2.11: Diagramma delle velocità ultrasoniche Vp ottenute dai dati acquisiti in modalità semidiretta per i tre litotipi analizzati.

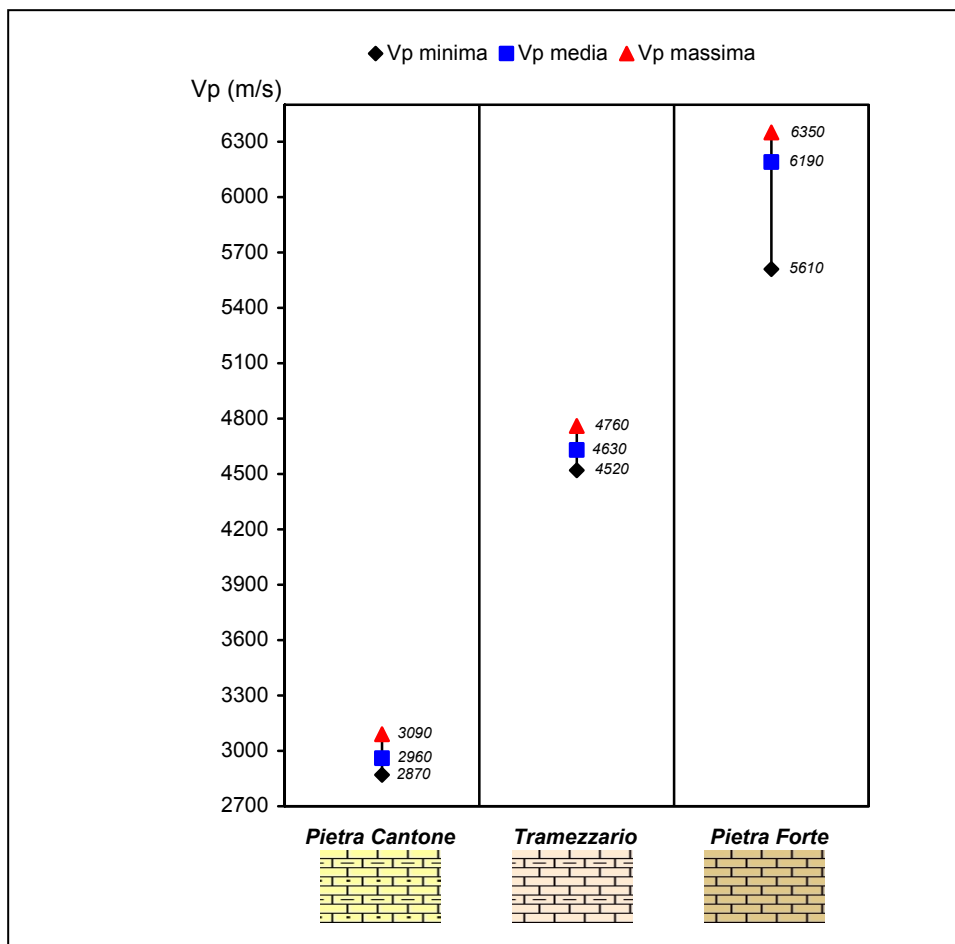


Figura 2.12: Diagramma delle velocità ultrasoniche V_p ottenute dai dati acquisiti in modalità indiretta per i tre litotipi analizzati.

Misure ultrasoniche effettuate su campioni saturi

Le misure ultrasoniche effettuate sui campioni allo stato saturo sono state realizzate anche allo scopo di calcolare la porosità per via dinamica, come descritto in diversi lavori realizzati nel settore petrolifero (e.g. Wyllie *et alii*, 1956, 1962; Kowallis *et alii*, 1984). Per il calcolo di tale parametro è necessario determinare i valori delle velocità ultrasoniche nei campioni saturi (V_{pf}). Pertanto, i campioni dei diversi litotipi di *Calcarea di Cagliari* (*Pietra Cantone*, *Tramezzario* e *Pietra Forte*) sono stati immersi in acqua al fine di ottenerne la saturazione. Successivamente sono stati sottoposti a misure ultrasoniche in trasmissione diretta, con impiego di trasduttori da 54 kHz.

Le velocità ottenute sui campioni saturi, sono state utilizzate per calcolare la porosità per via dinamica mediante la formula:

$$\phi = \frac{V_w(V_m - V_{pf})}{V_{pf}(V_m - V_w)}$$

dove:

V_w = velocità ultrasonica nel fluido che imbibisce i pori (nel nostro caso acqua);

V_m = velocità ultrasonica nel minerale primario;

V_{pf} = velocità ultrasonica nel mezzo saturo.

I risultati del calcolo delle porosità per via dinamica sono riportati in tabella 2.3.

<i>Litotipo</i>	<i>Pietra Cantone</i>	<i>Tramezzario</i>	<i>Pietra Forte</i>
V_{pf} media (m/s)	2500	4990	6210
Porosità (calcolata per via dinamica), espressa in %	47,3%	7,9%	0,1%

Tabella 2.3: Porosità calcolata per via dinamica e V_{pf} media rilevata nei campioni saturi

2.2.3 Confronto tra dati ultrasonici e contenuto in carbonati

Le misure calcimetriche, effettuate mediante calcimetro di Dietrich-Frühling (Figura 2.13 a), sono state finalizzate a determinare il contenuto in carbonati dei campioni delle rocce carbonatiche in studio, anche al fine di correlare tale contenuto con le velocità ultrasoniche calcolate in laboratorio. I risultati delle analisi calcimetriche sono riportati nella tabella 2.4.



Figura 2.13: (a) Calcimetro di Dietrich-Frühling usato per la determinazione dei carbonati; (b) campione polverizzato in fase di pesatura con bilancia elettronica di precisione.

<i>Sigla campione</i>	<i>Provenienza</i>	<i>Tipologia</i>	<i>Peso (g)</i>	<i>Lettura (mL)</i>	<i>Carbonati (g/Kg)</i>	<i>Carbonati (%)</i>
PC1a1	Via della Pineta	<i>Pietra Cantone</i>	0,5	102	802,02	80,2
PC1a2	Via della Pineta	<i>Pietra Cantone</i>	0,5	103	809,89	81
PC2a	Via dei Punici	<i>Pietra Cantone</i>	0,5	105	825,61	82,6
PC2b1	Via dei Punici	<i>Pietra Cantone</i>	0,5	98	770,57	77,1
PC2b2	Via dei Punici	<i>Pietra Cantone</i>	0,5	99	778,43	77,8
PC3a	Viale Buon Cammino	<i>Pietra Cantone</i>	0,5	102	802,02	80,2
PC4	Via Dexart	<i>Pietra Cantone</i>	0,5	107	841,34	84,1
Tr1b1	Viale Buon Cammino	<i>Tramezzario</i>	0,5	113	888,52	88,9
Tr1b2	Viale Buon Cammino	<i>Tramezzario</i>	0,5	112	880,65	88,1
Tr1c	Viale Buon Cammino	<i>Tramezzario</i>	0,5	110	864,93	86,5
Tr1a	Via Is Maglias	<i>Tramezzario</i>	0,5	112	880,65	88,1
Trx1	Via Castelli	<i>Tramezzario</i>	0,5	114	896,38	89,6
Trx2	Via Castelli	<i>Tramezzario</i>	0,5	114	896,38	89,6
Tr3	Cala Fighera	<i>Tramezzario</i>	0,5	114	896,38	89,6
PF1ga	Via della Pineta	<i>Pietra Forte</i>	0,5	125	982,87	98,3
PF2ga	Via della Pineta	<i>Pietra Forte</i>	0,5	125	982,87	98,3
PF1a1	Viale Buon Cammino	<i>Pietra Forte</i>	0,5	123	967,15	96,7
PF1a2	Viale Buon Cammino	<i>Pietra Forte</i>	0,5	124	975,01	97,5
PF3	Sa Spiaggiola	<i>Pietra Forte</i>	0,5	120	943,56	94,3

Tabella 2.4: Contenuto in carbonati dei campioni del distretto di Cagliari.

I campioni di *Pietra Cantone* hanno un contenuto in carbonati che varia dal 77,1% all'84,1%, i campioni di *Tramezzario* presentano contenuti compresi tra 86,5% e 89,6%, i campioni di *Pietra Forte* sono caratterizzati da contenuti compresi tra 94,3% e 98,3%.

Il *trend* delle velocità ultrasoniche calcolate in laboratorio per questi campioni è stato confrontato con il loro contenuto in carbonati. Per effettuare tale confronto si sono prese in considerazione le medie delle velocità ultrasoniche calcolate dai dati acquisiti in modalità diretta, utilizzando trasduttori con frequenza pari a 54 kHz.

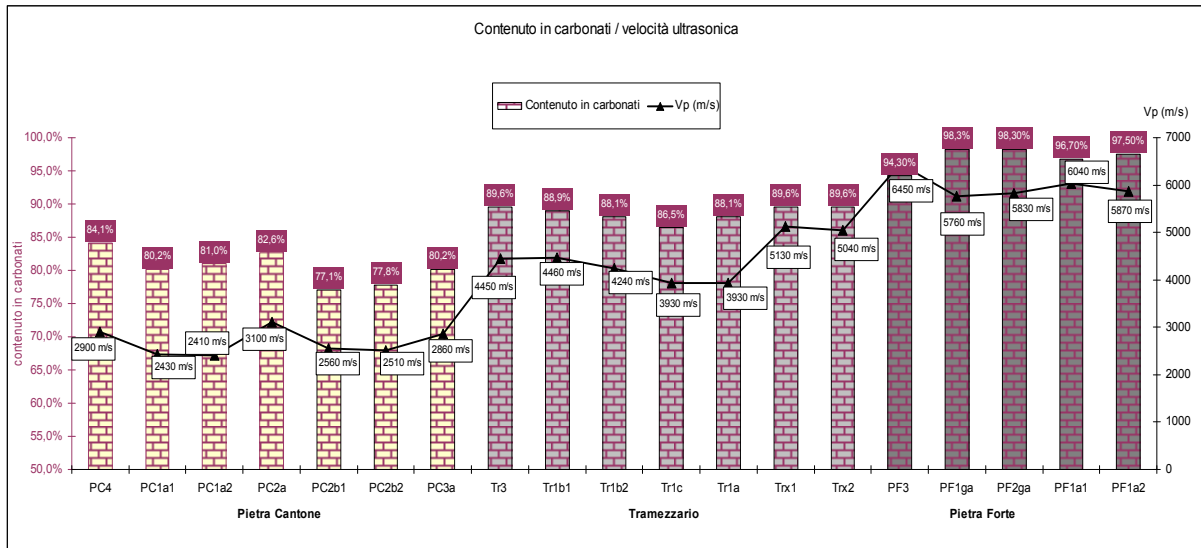


Figura 2.14: Trend delle velocità ultrasoniche al variare del contenuto in carbonati nei campioni.

Come si può notare nell'istogramma riportato in figura 2.14, il *trend* delle velocità ultrasoniche presenta, in generale, un incremento in funzione del contenuto in carbonati.

2.2.4 Analisi diffrattometriche

Parallelamente alle analisi calcimetriche, al fine di analizzare le associazioni mineralogiche dei campioni, sono state effettuate le analisi diffrattometriche (XRD).

Per queste analisi è stato utilizzato lo strumento PANalytical, modello XPERT-PRO presente nei laboratori della Facoltà di Scienze della Terra dell'Università di Cagliari (Figura 2.15).



Figura 2.15: Diffrattometro PANalytical XPERT-PRO utilizzato per le analisi XRD.

Nella tabella 2.5 sono riportate le impostazioni strumentali utilizzate per le analisi.

Sample stage	PW3071/xx Bracket
Scan Axis	Gonio
Start Position [$^{\circ}2\text{Th.}$]	5.0080
End Position [$^{\circ}2\text{Th.}$]	69.9820
Step Size [$^{\circ}2\text{Th.}$]	0.0170
Scan Step Time [s]	19.9650
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [$^{\circ}2\text{Th.}$]	2.02
Offset [$^{\circ}2\text{Th.}$]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [$^{\circ}$]	0.2500
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [$^{\circ}\text{C}$]	25.00
Anode Material	Cu
Generator Settings	40 kV, 40 mA
Goniometer Radius [mm]	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	100.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	No

Tabella 2.5: Impostazioni strumentali utilizzate per le analisi XRD dei campioni.

I campioni di calcare oligo-miocenico provenienti dal distretto di Cagliari e analizzati mediante tecnica XRD, sono stati ottenuti dalle polveri ricavate dai campioni indicati con le sigle PF1a1, PF1ga, PF2ga (*Pietra Forte*); Tr1a, Tr1b1, Tr1c, Trx1 (*Tramezzario*); PC1a1, PC2a, PC2b1, PC3a (*Pietra Cantone*).

I diffrattogrammi dei campioni PF1a1, PF1ga, PF2ga, Tr1a, Tr1b1, Tr1c, Trx1, PC2a, PC2b1, due dei quali (campioni PF1a1 e Tr1a) sono riportati nelle figure 2.16 e 2.17, evidenziano una composizione monominerologica calcitica.

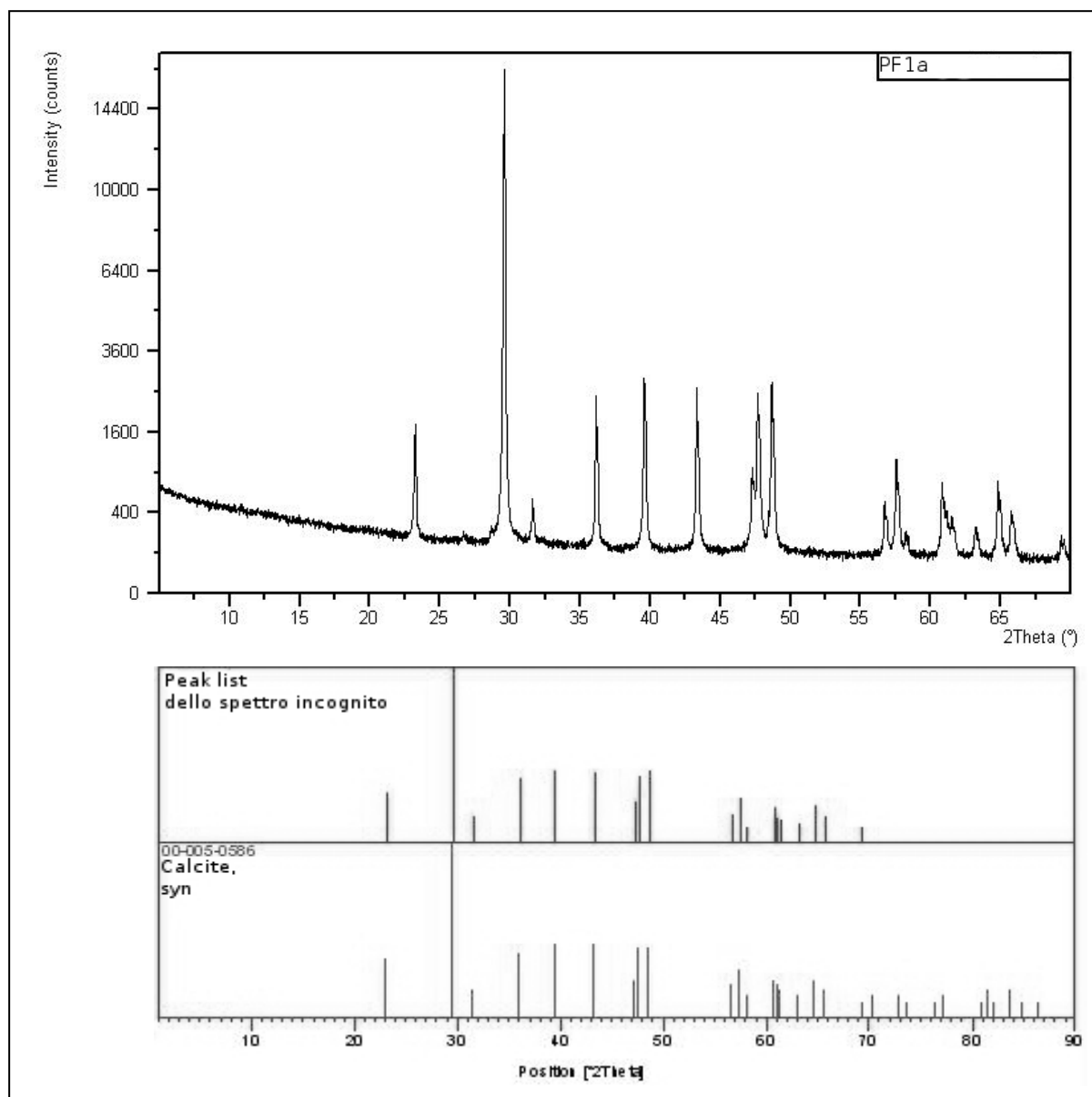


Figura 2.16: Diffrattogramma del campione PF1a1.

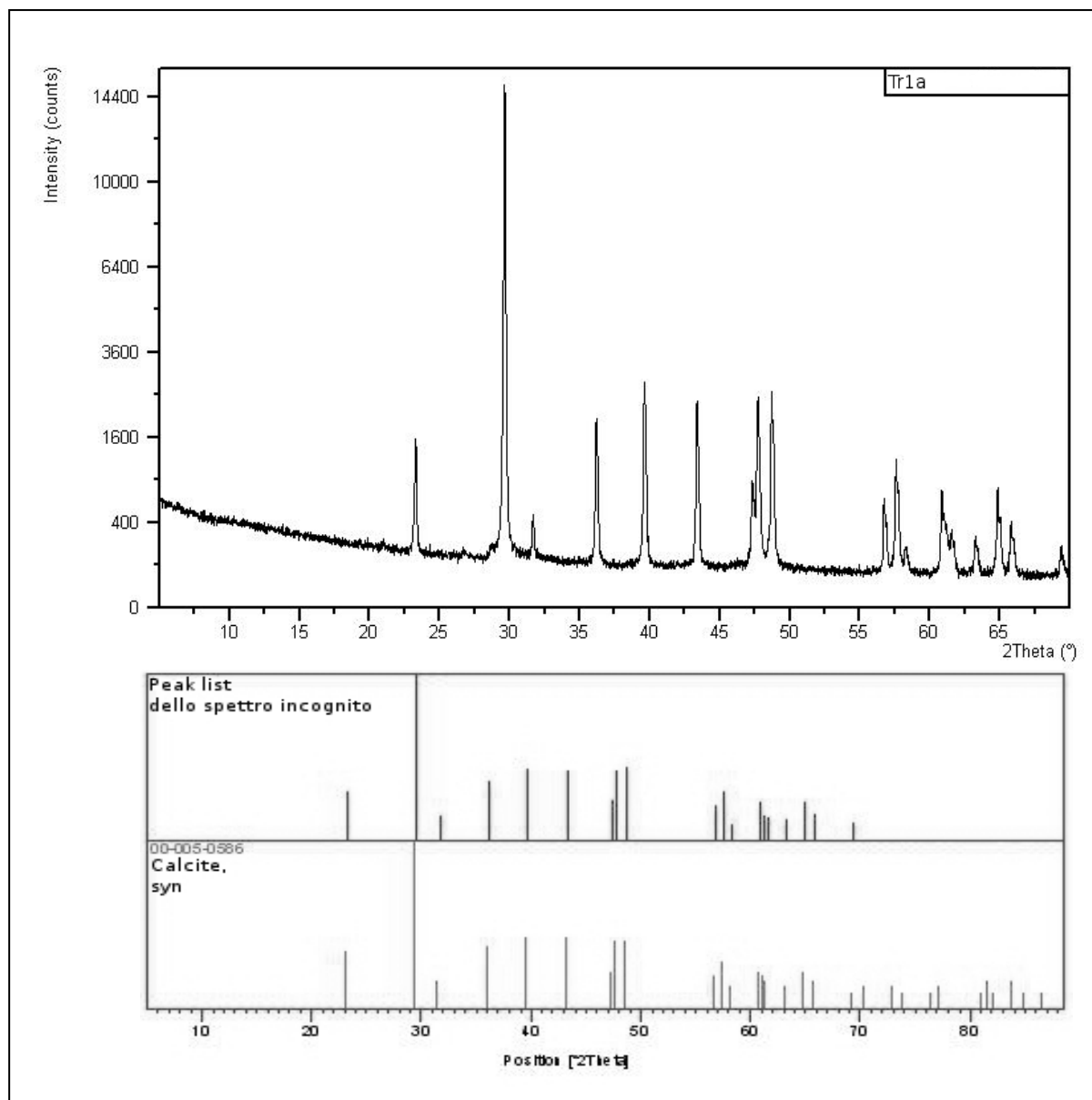


Figura 2.17: Diffratogramma del campione Tr1a.

I diffratogrammi dei campioni PC1a1 e PC3a, riportati nelle figure 2.18 e 2.19, evidenziano invece, una composizione mineralogica data da calcite e muscovite.

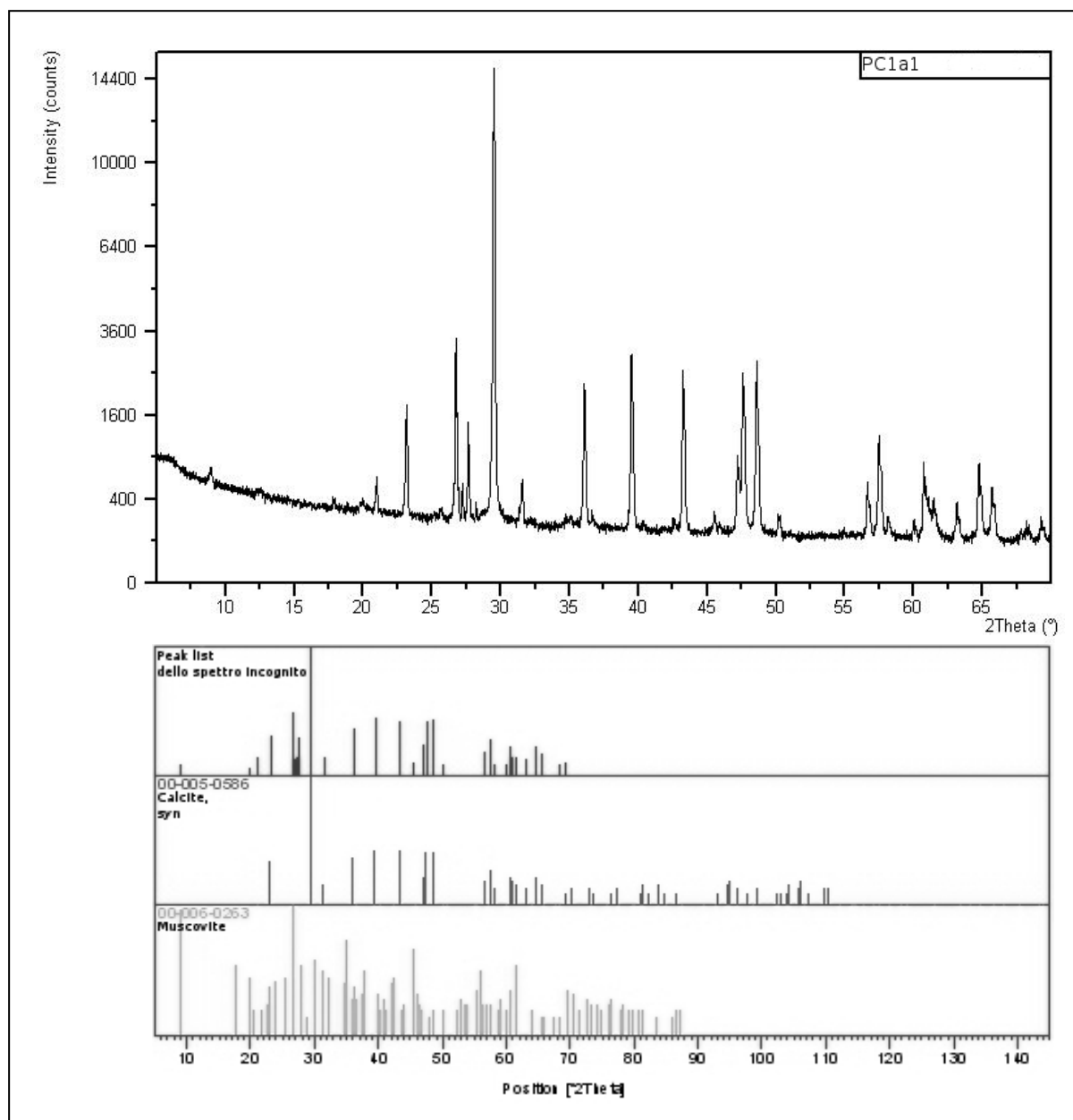


Figura 2.18: Diffratogramma del campione PC1a1.

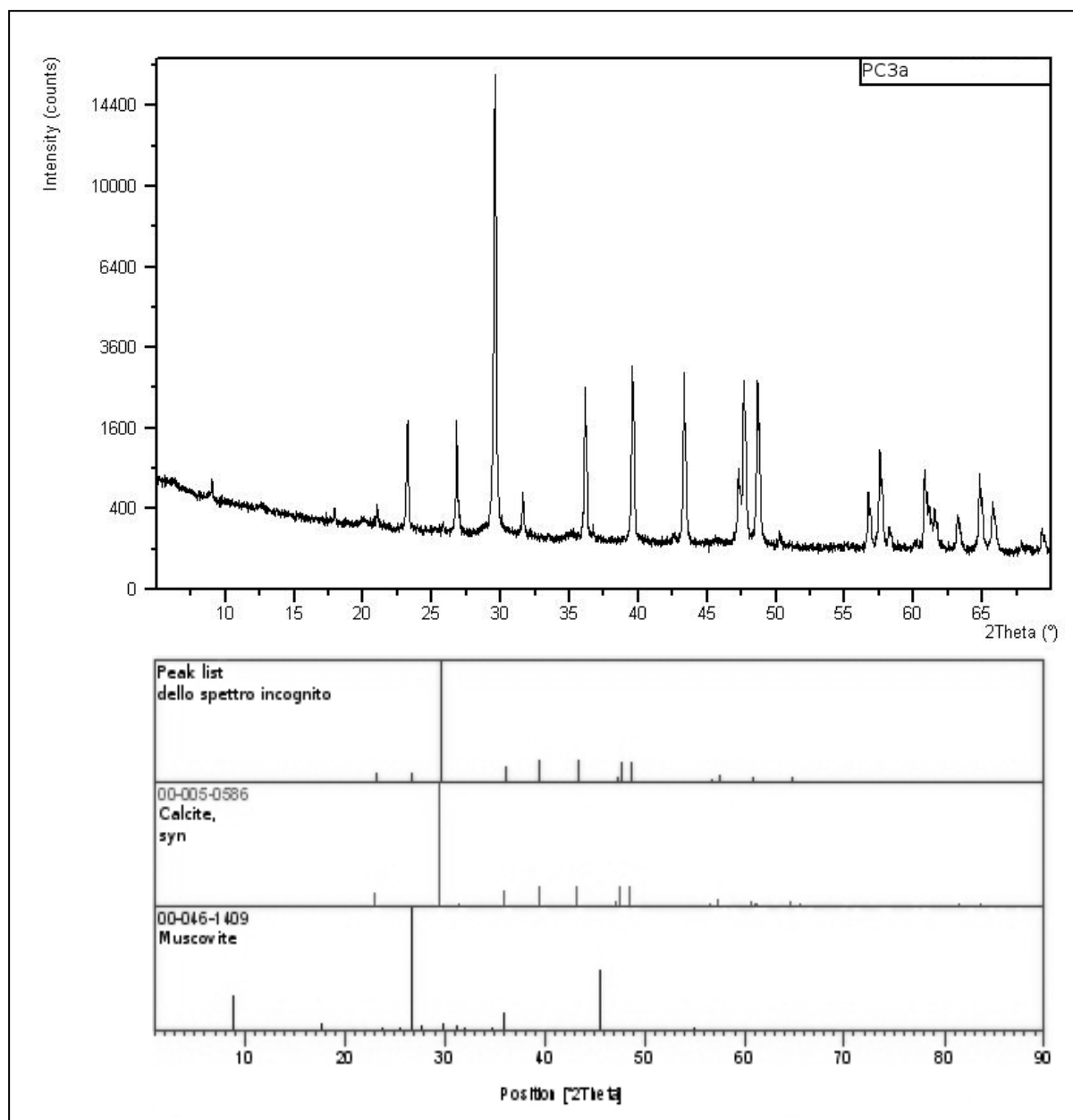


Figura 2.19: Diffrattogramma del campione PC3a.

In sintesi, le associazioni mineralogiche riscontrate sono le seguenti: esclusivamente calcite per i campioni PF1a1, PF1ga, PF2ga, Tr1a, Tr1b1, Tr1c, Trx1, PC2a, PC2b1; calcite e muscovite per i campioni PC1a1 e PC3a (campioni di *Pietra Cantone*). Pertanto, le analisi diffrattometriche confermano che i campioni di roccia analizzati sono riferibili a litologie di tipo carbonatico, in quanto il minerale dominante è sempre la calcite. La presenza di minerali accessori, quali la muscovite, sono occasionalmente presenti, in quantità decisamente subordinate, in alcuni campioni di *Pietra Cantone*.

Per meglio evidenziare le differenze di due campioni (uno composto da sola calcite e l'altro da calcite e subordinatamente, muscovite), in figura 2.20 vengono confrontati i diffrattogrammi dei campioni PF1a1 e PC1a1. Come si può notare, nel diffrattogramma del campione PC1a1 (*Pietra Cantone*), si osservano i picchi tipici della muscovite, non presenti nel diffrattogramma del campione PF1a1 (*Pietra Forte*).

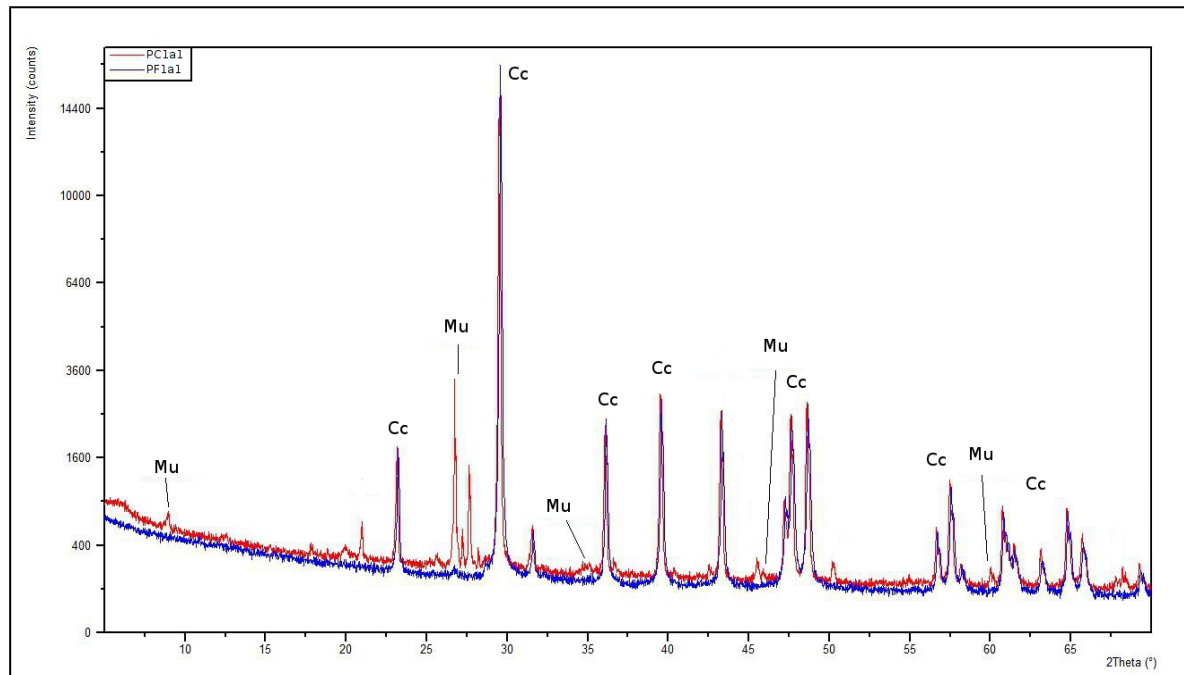


Figura 2.20: Diffrattogrammi dei campioni PC1a1 (di colore rosso) e PF1a1 (di colore blu); Cc: picchi tipici della calcite, Mu: picchi tipici della muscovite.

Si può notare, invece, come si riscontri la perfetta coincidenza degli altri numerosi picchi, che sono quelli tipici della calcite e che costituisce la componente principale dei due campioni.

2.2.5 Analisi in microscopia ottica

Per ottenere delle informazioni sulle caratteristiche del fabric (tessitura, struttura e orientazione dei diversi componenti) dei calcari analizzati, sono state effettuate delle osservazioni in microscopia ottica su sezioni sottili, ricavate dagli stessi campioni impiegati per le altre analisi effettuate in laboratorio.

La sezione sottile del campione PC2a (Figura 2.21), è stata ricavata da un campione proveniente da un affioramento sito in Via dei Punici a Cagliari e appartenente al litotipo *Pietra Cantone*. Tale sezione sottile mostra una tessitura prevalentemente micritica, con sparsi bioclasti di forma sub-arrotondata, zone ricristallizzate a sparite ed una presenza di una certa percentuale (3% ca., stimata visivamente) di elementi terrigeni che potrebbero essere

ossidi. Il campione in sezione ha una tessitura matrice-sostenuta con forma dei grani arrotondata.

Tenendo conto della terminologia per i tipi di porosità proposta da Choquette & Pray (1970), possiamo dire che la porosità di questo campione è del tipo “da finestre” (*fenestral*). La mesoporosità, misurata mediante stima visuale in tutta la sezione, è risultata pari al 5%.

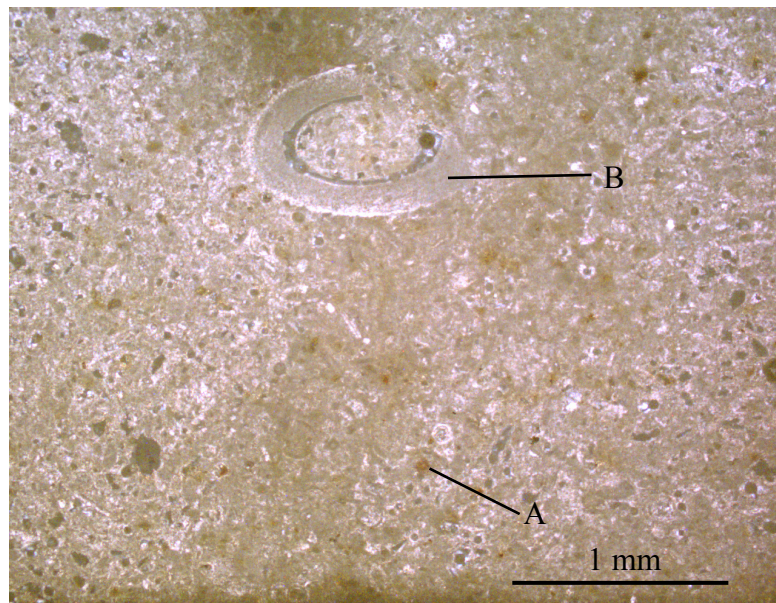


Figura 2.21: Particolare della sezione sottile del campione PC2a (A: ossidi [?]; B: bioclasti); ingrandimento $\times 2,5$.

Considerando l’abbondante quantità di micrite (oltre 2/3) osservata e la scarsa quantità di bioclasti, utilizzando la classificazione di Folk (1959), possiamo classificare il campione in questione come una micrite fossilifera. Utilizzando la classificazione proposta da Dunham (1962), riconoscendo la tessitura fango-sostenuta osservabile e la percentuale di grani visibili (non superiori del 10%), si può classificare il campione come un *mudstone*. Anche utilizzando la classificazione proposta da Embry & Klovan (1971), ispirata a quella di Dunham, questo campione è stato classificato come un *mudstone*.

Sono visibili, in sezione, resti di macrofossili come gasteropodi, lamellibranchi o bivalvi. L’ambiente deposizionale è riferibile al piano circalitorale (Spano & Barca, 2002).

La microfauna osservata nella sezione sottile comprende foraminiferi planctonici (*Globorotalia linguaensis*, *Globorotalia praemenardii*, *Globigerina nepentes*, *Orbulina suturalis*, *Globigerinoides obliquus*), che peraltro hanno permesso di datare la *Pietra Cantone* al Tortoniano (Pecorini, 1972; Pomesano Cherchi, 1974).

La sezione sottile del campione PC4 (Figura 2.22), è stata ricavata da un campione proveniente da un affioramento sito in Via Dexart a Cagliari e appartenente al litotipo *Pietra Cantone*. La sezione osservata ha una tessitura prevalentemente micritica, con sparsi bioclasti arrotondati, zone ricristallizzate a sparite ed una presenza omogenea di una certa percentuale (1-2% ca., stimata visivamente) di elementi terrigeni che potrebbero essere ossidi. Nella sezione si osserva una tessitura matrice-sostenuta con forma dei grani arrotondata.

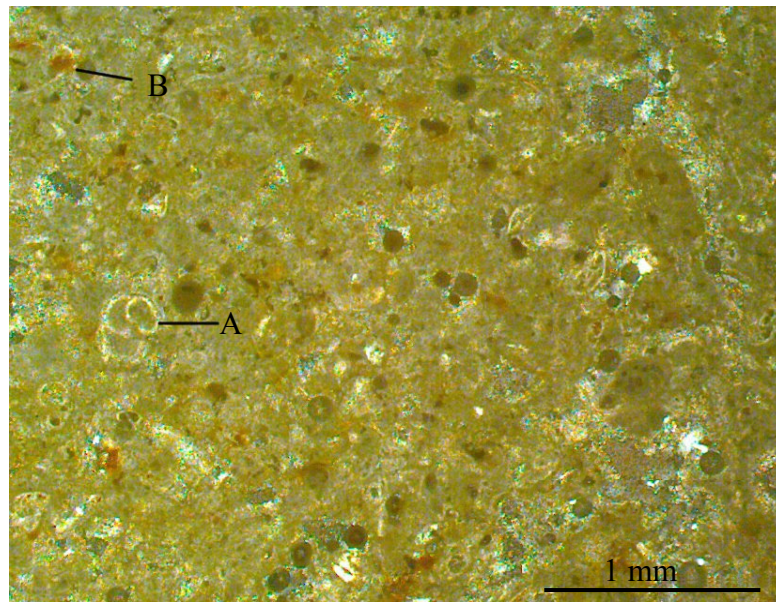


Figura 2.22: Particolare della sezione sottile del campione PC4 (A: bioclasti; B: ossidi [?]); ingrandimento $\times 2,5$.

Tenendo conto della terminologia proposta da Choquette & Pray (1970), possiamo dire che la porosità di questo campione è del tipo “da finestre” (*fenestral*). La mesoporosità, misurata in tutta la sezione, è risultata pari al 6%.

Considerando l’abbondante quantità di micrite (oltre 2/3) osservata e dello scarso numero di bioclasti, utilizzando la classificazione di Folk (1959), possiamo classificare anche questo campione come una micrite fossilifera. Utilizzando la classificazione proposta da Dunham (1962), considerando la tessitura fango-sostenuta osservabile e la percentuale di grani visibili (non superiori del 10%), si può classificare il campione come un *mudstone*. Anche utilizzando la classificazione proposta da Embry & Klovan (1971), questo campione è stato classificato come un *mudstone*.

Sono visibili in sezione, resti di macrofossili come gasteropodi, lamellibranchi o bivalvi. La microfauna osservata nella sezione sottile comprende anche foraminiferi planctonici.

La sezione sottile del campione Tr1c (Figura 2.23), è stata ricavata da un campione di roccia proveniente da un affioramento in Viale Buon Cammino a Cagliari e appartenente al litotipo *Tramezzario*.

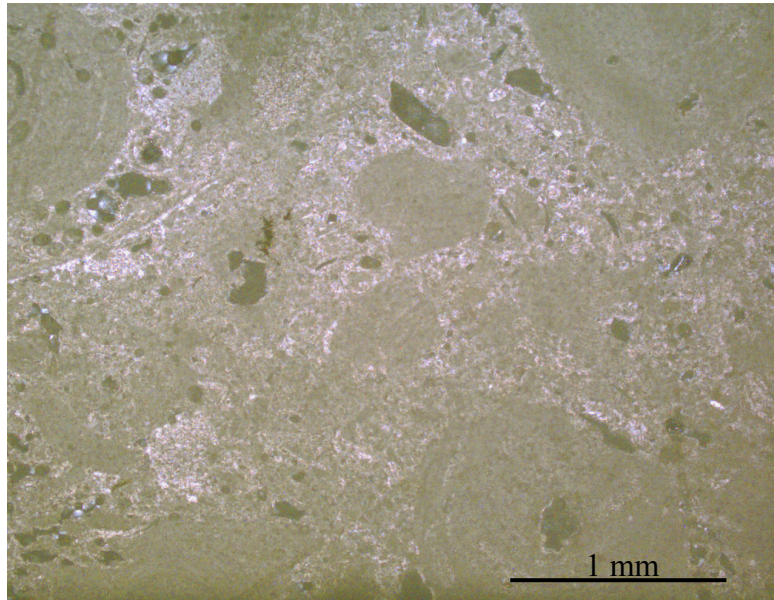


Figura 2.23: Particolare della sezione sottile del campione Tr1c, ingrandimento $\times 2,5$.

Questo campione, come osservabile in sezione sottile, presenta una grande quantità di micrite, sono osservabili anche diversi bioclasti. La roccia in questione mostra una tessitura matrice-sostenuta, seppure con grani di forma sub-arrotondata più ravvicinati rispetto alla *Pietra Cantone*. Prendendo come base la terminologia proposta da Choquette & Pray (1970), la porosità del campione è del tipo “da vacui riparati” (*shelter*). La mesoporosità, misurata in tutta la sezione, è risultata pari al 2%.

Considerata la quantità di micrite (oltre 2/3) e la maggiore quantità di bioclasti osservati che si possono distinguere in tutta la sezione sottile, utilizzando la classificazione di Folk (1959), possiamo classificare questo campione come una biomicrite. Adottando invece la classificazione proposta da Dunham (1962) e tenendo conto della tessitura fango-sostenuta distinguibile e della percentuale di grani visibili (superiori del 10%), si può classificare il campione come un *wackestone*. Anche utilizzando la classificazione proposta da Embry & Klovan (1971), questo campione è stato classificato come un *wackestone*. Sono osservabili, in sezione, resti di macrofossili tra i quali bivalvi, abbondanti alghe (“*Lithothamnium*”) e colonie di briozoi. L’ambiente deposizionale è riferibile al piano infralitorale-circalitorale (Spano & Barca, 2002). La microfauna individuabile in sezione sottile comprende i foraminiferi (*Globorotalia* sp., *Globigerina* sp.), che insieme ai frammenti di lamellibranchi e gasteropodi

hanno permesso di datare il *Tramezzario* al Tortoniano (Pecorini, 1972; Pomesano Cherchi, 1974).

La sezione sottile del campione Tr3 (Figura 2.24), è stata ricavata da un campione di roccia proveniente da un affioramento in località Cala Fighera a Cagliari e appartenente al litotipo *Tramezzario*.

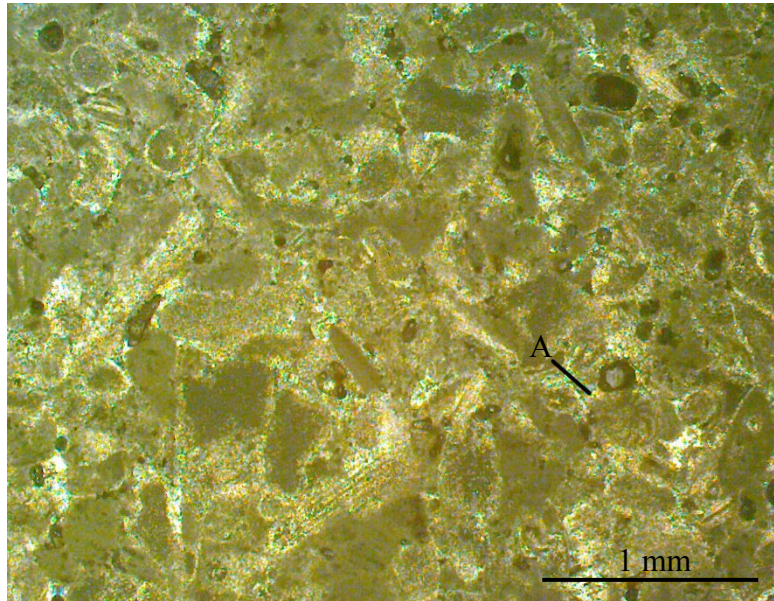


Figura 2.24: Particolare della sezione sottile del campione Tr3 (A: bioclasti); ingrandimento $\times 2,5$.

Anche questo campione, come osservabile in sezione sottile, presenta una grande quantità di micrite con numerosi frammenti organogeni, vari esemplari di bioclasti e una certa quantità di sparite. Si possono osservare piccole zone di ossidazione, attribuibili probabilmente ad elementi terrigeni che comunque si mantengono entro la quantità dell'1% (stimata visivamente). La roccia in questione mostra una tessitura matrice-sostenuta, con grani di forma sub-arrotondata. Utilizzando la terminologia proposta da Choquette & Pray (1970), la porosità del campione è del tipo “da vacui riparati” (*shelter*). La mesoporosità, misurata in tutta la sezione, è risultata pari al 3%.

Tenendo conto della quantità di micrite (oltre 2/3) e dei numerosi bioclasti che si possono distinguere in tutta la sezione sottile, utilizzando la classificazione di Folk (1959), possiamo classificare questo campione come una biomicrite. Adottando invece la classificazione proposta da Dunham (1962), considerando la tessitura fango-sostenuta e la percentuale di grani visibili (superiori del 10%), si può classificare anche questo campione come un

wackestone. Anche utilizzando la classificazione proposta da Embry & Klovan (1971), questo campione è stato classificato come un *wackestone*. Sono osservabili, in sezione, resti di macrofossili tra i quali bivalvi, abbondanti alghe e colonie di briozoi. La microfauna individuabile in sezione sottile comprende i foraminiferi, insieme ai frammenti di lamellibranchi e gasteropodi.

La sezione sottile del campione PF1a1 (Figura 2.25) è stata ricavata da un campione di roccia proveniente da un affioramento sito in Viale Buon Cammino a Cagliari ed appartenente al litotipo *Pietra Forte*.

Il campione è costituito da micrite e calcite spatica (sparite), è ricco di resti organogeni a molluschi e soprattutto ad alghe (litotamni), a grossi foraminiferi e colonie di briozoi.

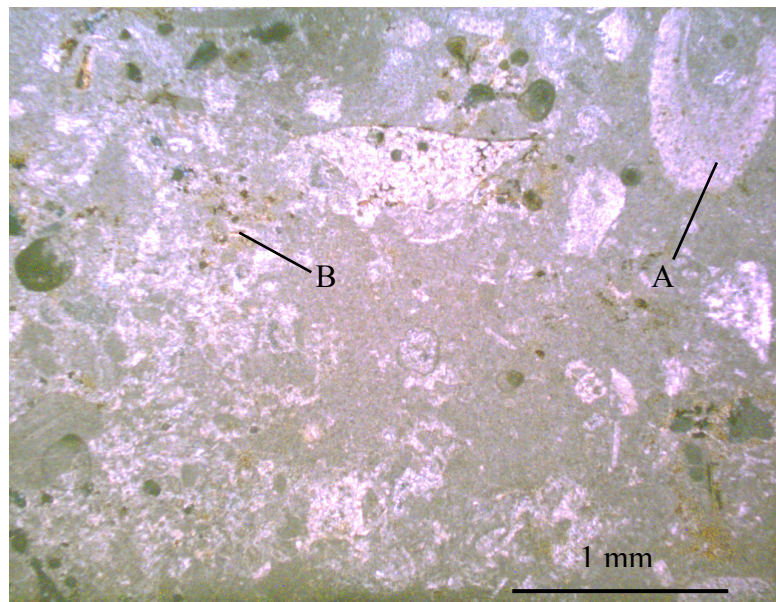


Figura 2.25: Particolare della sezione sottile del campione PF1a1 (A: bioclasti; B: tracce di ossidazione[?]); ingrandimento $\times 2,5$.

Anche in questa sezione si nota una presenza sparsa di una certa percentuale (1% ca., stimata visivamente) di elementi che potrebbero essere ossidi. Utilizzando la terminologia proposta da Choquette & Pray (1970), la porosità è del tipo “da vacui strutturali” (*growth framework*), e del tipo “da condotti” (*channel*), la forma dei grani è sub-angolare. La mesoporosità, misurata in tutta la sezione, è risultata pari all’1%. Vista la subuguale quantità di micrite e sparite, osservabile in tutta la sezione sottile, utilizzando la classificazione di Folk (1959), è possibile classificare il campione in questione come una biosparite “scarsamente pulita”. Secondo la classificazione proposta da Dunham (1962), tenendo conto della tessitura grano-sostenuta, si

potrebbe classificare il campione come un *packstone*. Anche utilizzando la classificazione proposta da Embry & Klovan (1971), questo campione è stato classificato come *packstone*, infatti è presente una percentuale minore del 10% di componenti con dimensioni > 2mm.

Sono rilevabili, in sezione, resti di macrofossili tra i quali si possono notare bivalvi, colonie di briozoi, alghe e gasteropodi. L'ambiente deposizionale è riferibile al piano batimetrico infralitorale-circalitorale (Spano & Barca, 2002).

Su base bibliografica, in base all'associazione delle microfaune planctoniche, la *Pietra Forte* è stata riferita al Tortoniano e, per affinità con altre formazioni analoghe del Golfo di Oristano, al Messiniano e forse in parte anche al Pliocene (Pecorini, 1972; Pomesano Cherchi, 1974).

La sezione sottile del campione PF3 (Figura 2.26), è stata ricavata da un campione di roccia proveniente da un affioramento in località "Sa Spiaggiola" a Cagliari ed appartenente al litotipo *Pietra Forte*. Anche questo campione è costituito da micrite e calcite spatica, la calcite spatica rappresenta il cemento di riempimento dei pori e delle fratture presenti e ben visibili. Il campione è ricco di resti organogeni a molluschi e soprattutto ad alghe (litotamni) e a grossi foraminiferi e colonie di briozoi.

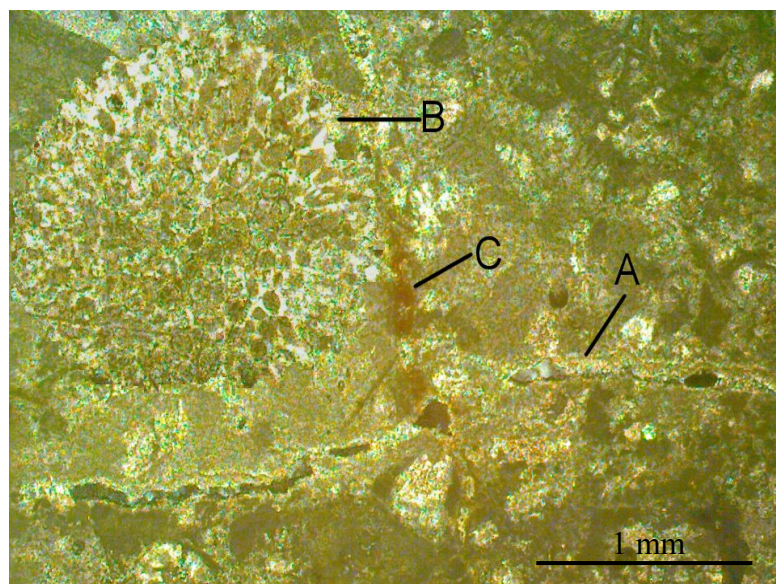


Figura 2.26: Particolare della sezione sottile del campione PF3 (A: frattura; B: bioclasti; C: tracce di ossidazione[?]); ingrandimento $\times 2,5$.

La sezione sottile osservata, oltre a mostrare zone ricristallizzate a sparite soprattutto nelle frequenti fratture, presenta zone che sembrerebbero ossidate (1% ca., stima visiva).

La roccia studiata è un calcare organogeno di scogliera (*auct.*), la sezione sottile mostra una tessitura grano-sostenuta con grani di forma sub-angolare. Utilizzando la terminologia che descrive i tipi di porosità proposta da Choquette & Pray (1970), la porosità di questo campione è del tipo “da vacui strutturali” (*growth framework*), e del tipo “da condotti” (*channel*). La mesoporosità, misurata mediante stima visuale in tutta la sezione, è risultata pari all’1%. Vista la uguale quantità di micrite e sparite, utilizzando la classificazione di Folk (1959), è possibile classificare anche questo campione come una biosparite “scarsamente pulita”. Secondo la classificazione proposta da Dunham (1962), tenendo conto della tessitura grano-sostenuta, si potrebbe classificare il campione come un *packstone*. Anche utilizzando la classificazione proposta da Embry & Klovan (1971), questo campione è stato classificato come *packstone*, infatti è presente una percentuale minore del 10% di componenti con dimensioni > 2mm. Sono rilevabili in sezione, resti di macrofossili tra i quali si possono notare bivalvi, colonie di briozoi, alghe e gasteropodi.

Le caratteristiche tessiturali osservate nelle sezioni sottili dei campioni sono state riassunte in tabella 2.6.

<i>Sigla campione</i>	PC2a (Pietra Cantone)	PC4 (Pietra Cantone)	Tr1c (Tramezzario)	Tr3 (Tramezzario)	PF1a1 (Pietra Forte)	PF3 (Pietra Forte)
<i>Litotipo</i>	Calcare marnoso-arenaceo (<i>auct.</i>)	Calcare marnoso-arenaceo (<i>auct.</i>)	Calcare debolmente marnoso (<i>auct.</i>)	Calcare debolmente marnoso (<i>auct.</i>)	Calcare organogeno di scogliera (<i>auct.</i>)	Calcare organogeno di scogliera (<i>auct.</i>)
<i>Tessitura dei grani</i>	matrice-sostenuta	matrice-sostenuta	matrice-sostenuta	matrice-sostenuta	grano-sostenuta	grano-sostenuta
<i>Forma dei grani</i>	arrotondata	arrotondata	sub-arrotondata	sub-arrotondata	sub-angolare	sub-angolare
<i>Tipo di porosità secondo Choquette & Pray (1970)</i>	“da finestre” (<i>Fenestral</i>)	“da finestre” (<i>Fenestral</i>)	“da vacui riparati” (<i>Shelter</i>)	“da vacui riparati” (<i>Shelter</i>)	“da vacui strutturali” (<i>Growth framework</i>); “da condotti” (<i>Channel</i>)	“da vacui strutturali” (<i>Growth framework</i>); “da condotti” (<i>Channel</i>)
<i>Mesoporosità (da stima visuale)</i>	5%	6%	2%	3%	1%	1%
<i>Classificazione secondo Folk (1959)</i>	Micrite fossilifera	Micrite fossilifera	Biomicrite	Biomicrite	Biosparite scarsamente pulita	Biosparite scarsamente pulita
<i>Classificazione secondo Dunham (1962)</i>	<i>Mudstone</i>	<i>Mudstone</i>	<i>Wackestone</i>	<i>Wackestone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Packstone</i>
<i>Classificazione secondo Embry & Klovan (1971)</i>	<i>Mudstone</i>	<i>Mudstone</i>	<i>Wackestone</i>	<i>Wackestone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Packstone</i>

Tabella 2.6: Caratteristiche del fabric dei campioni in sezione sottile.

2.2.6 Misure di densità assoluta

Le misure dirette della densità assoluta dei campioni dei tre litotipi di *Calcarea di Cagliari* (*Pietra Cantone*, *Tramezzario* e *Pietra Forte*) sono state effettuate tramite picnometro a elio *AccuPyc 1330* (Figura 2.27) della casa produttrice *Micromeritics*.



Figura 2.27: Picnometro a elio utilizzato per le determinazioni.

Per effettuare le determinazioni, i campioni sono stati ridotti in polvere e pesati con bilancia analitica. Il porta campioni è stato riempito per il 70% del suo volume.

Le misure sulle polveri dei campioni di *Pietra Cantone*, sono state effettuate su porzioni di materiale del peso di 10,3744 g, ad una temperatura esterna di 21,2 °C. Il report di volume e densità è riportato in tabella 2.7.

Misura #	Volume (cm ³)	Deviazione (cm ³)	Densità (g/cm ³)	Deviazione (cm ³)	Durata analisi (h:m:s)
1	3.8360	0.0010	2.7045	-0.0007	0:11:20
2	3.8352	0.0002	2.7051	-0.0001	0:13:28
3	3.8349	-0.0001	2.7052	0.0000	0:15:35
4	3.8345	-0.0005	2.7055	0.0003	0:17:44
5	3.8344	-0.0006	2.7056	0.0004	0:19:51

Tabella 2.7: Report dei campioni di *Pietra Cantone*.

Pertanto, per i campioni di *Pietra Cantone*, il volume (assoluto) medio calcolato è di 3,8350 cm³ e la densità (assoluta) media è di 2,7052 g/cm³.

Le misure sulle polveri dei campioni di *Tramezzario* sono state effettuate su porzioni del peso di 8,9703 g, ad una temperatura esterna di 22,5 °C. Il report di volume e densità è riportato nella tabella 2.8.

<i>Misura #</i>	Volume (cm ³)	Deviazione (cm ³)	Densità (g/cm ³)	Deviazione (cm ³)	Durata analisi (h:m:s)
1	3.2861	0.0027	2.7297	-0.0023	0:11:35
2	3.2826	-0.0009	2.7327	0.0007	0:13:40
3	3.2833	-0.0001	2.7321	0.0001	0:15:56
4	3.2830	-0.0005	2.7324	0.0004	0:18:02
5	3.2821	-0.0013	2.7331	0.0011	0:20:20

Tabella 2.8: Report di densità e volume per i campioni di *Tramezzario*.

Per i campioni di *Tramezzario*, il volume (assoluto) medio calcolato è di 3,2834 cm³ e la densità (assoluta) media è di 2,7320 g/cm³.

Le misure sulle polveri dei campioni di *Pietra Forte* sono state eseguite su porzioni del peso di 10,2444 g, ad una temperatura esterna di 21,1 °C. Il report di volume e densità è riportato in tabella 2.9.

<i>Misura #</i>	Volume (cm ³)	Deviazione (cm ³)	Densità (g/cm ³)	Deviazione (cm ³)	Durata analisi (h:m:s)
1	3.7771	0.0013	2.7122	-0.0009	0:11:29
2	3.7762	0.0004	2.7129	-0.0003	0:13:38
3	3.7757	-0.0001	2.7132	0.0001	0:15:47
4	3.7752	-0.0006	2.7136	0.0005	0:17:56
5	3.7749	-0.0009	2.7139	0.0007	0:20:09

Tabella 2.9: Report di densità e volume per i campioni di *Pietra Forte*.

In tabella 2.10, sono riportate le medie delle misure picnometriche relative ai campioni dei diversi litotipi in studio.

<i>Campione</i>	Volume (cm ³)	Densità media (g/cm ³)
<i>Pietra Cantone</i>	3,835	2,7052
<i>Tramezzario</i>	3,2834	2,732
<i>Pietra Forte</i>	3,7758	2,7132

Tabella 2.10: Densità assoluta media dei campioni.

Come si può osservare dalla tabella 2.10, i valori di densità dei tre litotipi sono molto simili, il valore più alto è stato misurato per il *Tramezzario*, il valore più basso per la *Pietra Cantone*. Analizzando i valori di densità e confrontandoli con quelli della porosità, calcolata per via dinamica e riportati in tabella 2.3, si riscontra che le due proprietà fisiche non sono, per i campioni di questi litotipi, tra loro correlate. Infatti, nelle misure di porosità calcolata per via dinamica, la porosità più elevata è stata misurata per i campioni di *Pietra Cantone*, mentre la porosità del *Tramezzario* risulta essere intermedia tra quella degli altri due litotipi (Tabella 2.3). È necessario osservare che i valori di porosità calcolati per via dinamica sono fortemente influenzati dal tipo di porosità aperta (che permette l'infiltrazione dell'acqua nel materiale) che caratterizza soprattutto i campioni di *Pietra Cantone*. I valori di densità misurati con il picnometro a elio (Tabella 2.10), si riferiscono a campioni ridotti in polvere. Con la macinazione dei campioni di roccia si elimina la porosità aperta, per cui la densità risulta essere esclusivamente quella della porzione solida del materiale che evidentemente è simile nei tre litotipi.

2.2.7 Misure di assorbimento d'acqua

Queste prove sono state effettuate al fine di misurare la capacità di assorbimento in acqua dei tre litotipi studiati. Le misure sono state realizzate mediante calcolo del "coefficiente di umidità" (o contenuto d'acqua), considerato come rapporto percentuale tra il peso dell'acqua P_a , contenuta nei campioni dopo prolungata immersione in acqua ($P_a = P - P_s$, dove P è il peso del campione umido e P_s è il peso del campione asciutto) ed il peso del campione asciutto.

Le misure hanno fornito i risultati presentati in tabella 2.11 e nell'istogramma in figura 2.28.

<i>Campione</i>	<i>Pietra Cantone</i>	<i>Tramezzario</i>	<i>Pietra Forte</i>
<i>Massa del campione secco (g)</i>	7531	6215	10914
<i>Massa del campione saturo (g)</i>	8115	6574	10957
<i>% Acqua assorbita</i>	7,75	5,77	0,39

Tabella 2.11: Percentuale di acqua assorbita per i tre litotipi in studio.

I campioni di *Pietra Cantone* hanno incrementato il loro peso del 7,75%, i campioni di *Tramezzario* del 5,77%, mentre i campioni di *Pietra Forte* assorbono molto meno, infatti hanno incrementato il loro peso dello 0,39 %.

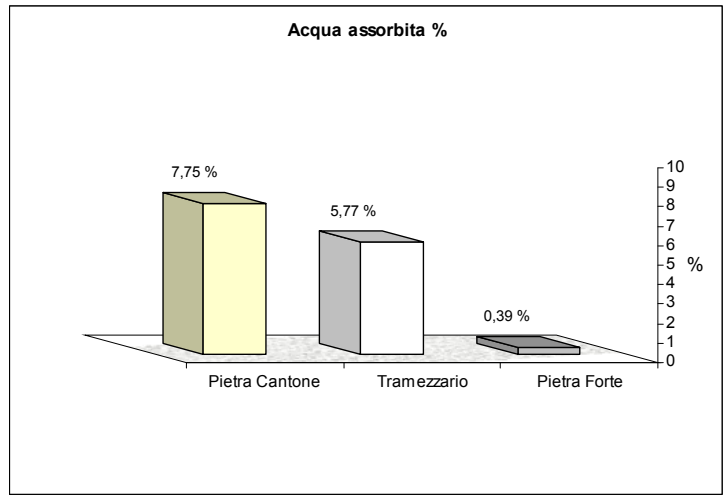


Figura 2.28: Istogramma della percentuale di acqua assorbita nei tre litotipi.

2.3 RILIEVI ULTRASONICI E TERMOGRAFICI IN SITO

Introduzione

Le sperimentazioni effettuate nelle strutture in sito a Cagliari hanno interessato due strutture monumentali del centro storico.

La prima struttura sottoposta ad indagine è il complesso monumentale dell'Exma'. I rilievi effettuati in questa struttura sono stati eseguiti in due settori. Il primo settore è localizzato nella parete esterna del corpo centrale del complesso che si affaccia sulla Via Logudoro, con un orientamento frontale Sud-Sud Ovest. In questo paramento, nel 2011 sono stati effettuati due rilievi in due diversi pannelli (pannello 4 e 7, in figura 2.31). Il pannello 7 era già stato oggetto di indagine nel 2005, quindi è stato possibile effettuare un monitoraggio temporale e fare delle osservazioni sull'evoluzione del deterioramento.

Il secondo elemento sottoposto ad indagine è un pilastro che fa parte del porticato antistante il caseggiato centrale dell'Exmà e che si affaccia sulla Via San Lucifero, nel quale sono stati effettuati 5 profili per trasparenza (in modalità diretta) nei diversi lati del pilastro, un rilievo di superficie (in modalità indiretta) nella faccia frontale del pilastro e un profilo a rifrazione in una zona frontale del pilastro, dove era stata individuata, in precedenza, una frattura.

La seconda struttura indagata è la Torre di San Pancrazio, dove è stata sottoposta ad indagine una parte del paramento esterno che si affaccia verso Est, in questa zona è stata effettuata una campagna di indagini ultrasoniche e una campagna di acquisizione termografica. In questo modo è stata resa possibile l'individuazione di eventuali utili correlazioni tra le mappe di velocità ultrasonica in situ e i termogrammi. Queste tecniche sono state abbinate anche perché la tecnica termografica permette di investigare solo sulla porzione superficiale dell'oggetto in esame, mentre la tecnica ad ultrasuoni, permette uno studio più profondo dello stato di conservazione dell'oggetto.

In entrambi i casi, le misure sono state effettuate al fine di valutare lo stato di conservazione dei materiali costruttivi. Tale valutazione è stata efficacemente realizzata tramite l'analisi comparata dei risultati delle misure realizzate *in situ* con quelli ottenuti dalla sperimentazione in laboratorio.

2.3.1 Edifici di interesse storico oggetto di studio

Il primo oggetto di indagine in sito è l'Exma' (ex mattatoio di Cagliari), (Figura 2.29). L'Exma' sorge nel quartiere di Villanova, uno dei più antichi della città di Cagliari, comprendente anche altre strutture monumentali, come la chiesa di San Lucifero ed il complesso della Basilica di San Saturnino.



Figura 2.29: Complesso monumentale dell'Exma'.

Ai tempi dell'edificazione, l'odierno Exma', si trovava in periferia, circondato da orti, vigne e giardini, e pertanto, venne scelto per la costruzione di un moderno mattatoio che consentisse di applicare tutte le norme igieniche previste all'epoca. Queste erano indispensabili per evitare che si perpetuasse una situazione, priva di qualsiasi controllo o di idonee normative igieniche, che stava diventando insostenibile.

Ancora nell'Ottocento, infatti, la condizione dell'abbattimento del bestiame si svolgeva all'aria aperta, senza la considerazione di alcuna norma igienica, e come descriveva il La Marmora: "creando veri focolai di infezione".

La costruzione del Mattatoio fu avviata nel 1845 su progetto del Cavalier Barabino, Maggiore del Genio Militare, che ne curò, almeno nella prima fase, la direzione dei lavori, imponendo così, una regolamentazione all'attività mattatoria cittadina (Segni Pulvirenti *et alii*, 1993).

Benché tale complesso rappresentasse per l'epoca una realizzazione assai funzionale, esso non incontrò il favore dei contemporanei. Infatti, a poco meno di trent'anni dalla sua costruzione, nel 1880, l'Amministrazione Comunale pensava già di abbandonare il fabbricato esistente e di costruirne uno nuovo in una zona periferica della città.

Nel 1902 se ne intraprese una radicale ristrutturazione. Il progetto originario prevedeva un caseggiato centrale, tuttora esistente, un vasto piazzale che occupa il centro del complesso e quattro edifici minori eretti agli angoli del recinto, questi erano destinati agli uffici dell'amministrazione etc. Su questo cortile si aprivano i locali destinati alla sosta del bestiame e vi era una grande cisterna, ubicata sotto il piazzale.

Al complesso si accedeva da via San Lucifero, attraverso un ampio portale sul quale dominavano le insegne del macello: una protome bovina al centro con festoni e due protomi di montone a lato, scolpite nel marmo dallo scultore Pili.

I lati lunghi dell'edificio centrale erano ornati da altre sedici protomi bovine, forse opere dello stesso scultore.

L'intera opera venne realizzata tra il 1845 ed il 1852, con interventi suddivisi in lotti, come è ben documentato dalla corrispondenza intercorsa tra il Genio Militare, realizzatore dell'opera, ed il Municipio di Cagliari.

Le numerose variazioni di destinazione d'uso dei locali, susseguitesì nel corso di questo secolo, hanno lasciato il segno specialmente nelle parti più antiche, con pesanti superfetazioni, aggiunte, modifiche e trasformazioni sovrappostesi le une alle altre.

La più evidente di queste trasformazioni è stata la demolizione dei due edifici all'angolo di Via Sonnino, avvenuta per consentire l'allargamento della strada lungo la quale, con il nuovo assetto urbanistico, venne costruita la linea tramviaria che collegava il capoluogo al Campidano di Quartu.

L'edificio rimase in attività fino all'ottobre del 1964 quando, completato il nuovo mattatoio di Via Po, venne utilizzato, dal Comune di Cagliari, come autoparco e deposito (Segni Pulvirenti *et alii*, 1993).

Come già indicato, la seconda struttura, oggetto di indagine, è la Torre di San Pancrazio (Figura 2.30), dove è stata sottoposta ad analisi una parte del paramento esterno, che si affaccia verso Est.

La Torre di San Pancrazio è datata epigraficamente al 1305 ed è stata progettata dall'Architetto Giovanni Capula. Le due porte guardate dalle torri di San Pancrazio e dell'Elefante (torre molto simile a quella di San Pancrazio), sono le uniche, insieme alle torri stesse, integralmente superstiti della cerchia muraria eretta dai Pisani agli inizi del XIV secolo, sotto la direzione dello stesso architetto Capula. Le due torri, quindi, furono erette dai Pisani per rafforzare la cinta muraria, perché, nei primi anni del Trecento, si paventava un attacco catalano a seguito della concessione del *Regnum Sardiniae* a Giacomo II Re d'Aragona. Le mura, assieme alle Torri, sono sempre state subordinate alla funzione

difensiva, quindi legate all'evoluzione militare che apportò variazioni alla loro struttura, fino a quando, nell'Ottocento, furono sempre meno utili agli scopi militari. Tuttavia, non interferendo con lo sviluppo moderno della città, pianificato ai piedi del Castello, mura e torri sono state solo parzialmente abbattute, giungendo relativamente integre fino ai giorni nostri (www.sardegna.cultura.it).



Figura 2.30: Torre di San Pancrazio.

A proposito della Torre di San Pancrazio, Alberto Della Marmora, nel suo “Itinerario Dell’Isola di Sardegna”, recita: “Questo notevole edificio risale all’anno 1307 [...]. È opera di un Architetto pisano chiamato Giovanni Capula. La torre di San Pancrazio si trova all’estremità settentrionale del Castello propriamente detto, e sulla parte più alta di questo quartiere cittadino; alla base si addossa verso Sud una costruzione più moderna che consente l’ingresso alla prigione. La porta che esisteva alla base e che, come quelle dell’Aquila e dell’Elefante, apparteneva alla cinta pisana, è attualmente obliterata, ma se ne riconoscono le tracce nella facciata della torre che guarda a Nord. La porta che si trova a fianco, così come il vicino bastione, sono opera degli Spagnoli e più tardi dei principi di Savoia. La data di questa torre precede di due anni quella dell’Elefante, ma è opera dello stesso Architetto. [...] Questa torre, con le parti aggiunte che la deturpano, è diventata da molti anni la principale prigione della città e dell’Isola. La metà superiore, libera da costruzioni recenti, è ammirevole per la perfetta conservazione. I materiali sono gli stessi usati per la costruzione delle torri

dell'Aquila e dell'Elefante, le pietre accuratamente tagliate e giustapposte nella stessa maniera. In cima alla piattaforma a circa 30 metri d'altezza dal suolo e a 129,92 metri sul livello del mare, si eleva, nell'angolo Sud-Ovest, un'altra piccola torre anch'essa di pianta quadrata, che nel passato serviva da vedetta e in cui si sale per qualche gradino" (Della Marmora, 1860).

2.3.2 Complesso dell'Exmà

Come già indicato in precedenza, i rilievi ultrasonici effettuati all'Exmà sono stati eseguiti in due differenti elementi strutturali del monumento. Il primo elemento è il paramento esterno del corpo centrale del complesso che si affaccia sulla Via Logudoro, con un orientamento frontale Sud-Sud Ovest. In questo settore, nel 2011, sono stati effettuati dei rilievi di superficie (in modalità indiretta), in due pannelli del paramento esterno (pannello 4 e 7), la cui localizzazione è riportata in figura 2.31. Il pannello 7 era già stato oggetto di indagine nel 2005. Pertanto, per tale pannello è stato possibile effettuare un monitoraggio temporale con conseguenti osservazioni sull'evoluzione del deterioramento in atto. Per le indagini, sono stati scelti i predetti pannelli in quanto si voleva investigare lo stato di conservazione dei materiali sottostanti l'intonaco parzialmente integro.



Figura 2.31: Localizzazione dei pannelli del paramento esterno dell'Exmà sottoposti ad indagine.

Il secondo elemento investigato è un pilastro che fa parte del porticato antistante il caseggiato centrale dell'Exmà e che si affaccia sulla Via San Lucifero (Figura 2.32). Considerando l'oggetto da investigare, essendo ispezionabili tutte le superfici dell'elemento, sono stati effettuati 5 profili per trasparenza (in modalità diretta). Inoltre, per approfondire le indagini sullo stato di conservazione di una superficie del pilastro che appariva più degradata delle altre, si è deciso di effettuare anche un rilievo in modalità indiretta. Sulla stessa superficie è stato eseguito un profilo a rifrazione per il controllo di una frattura visibile in affioramento. Per tutte le investigazioni è stato impiegato lo strumento P.U.N.D.I.T. utilizzato anche per le misure di laboratorio.



Figura 2.32: Pilastro del porticato di ingresso del complesso dell'Exmà.

Analisi effettuate nel paramento esterno del corpo centrale del complesso dell'Exmà

Rilievi ultrasonici

Nei primi elementi investigati (pannelli 4 e 7), sono stati effettuati dei rilievi ultrasonici in modalità indiretta. Per la realizzazione dei rilievi ultrasonici si è applicata la tecnica di acquisizione *step by step*. Questa consiste nello spostare il trasmettitore ed il ricevitore, mantenuti a distanza costante l'uno dall'altro, su posizioni successive. È stata scelta questa modalità operativa in quanto si volevano ottenere delle mappe di velocità ultrasonica che consentissero di acquisire informazioni sulle caratteristiche elasto-meccaniche e sulle condizioni di conservazione dei materiali costruttivi dei paramenti esterni.

Rilievi effettuati nel 2011

Per questi rilievi ultrasonici sono stati impiegati trasduttori con frequenza di 54 kHz. Tale frequenza è stata scelta in quanto consente una profondità di indagine adeguata ad investigare i materiali sotto l'intonaco. La profondità di indagine ultrasonica è inversamente proporzionale alla frequenza dei trasduttori. Utilizzando trasduttori a bassa frequenza si riescono ad investigare porzioni più profonde dei materiali ma a discapito della risoluzione nella definizione dei difetti incontrati dall'impulso ultrasonico. In questo caso, utilizzando trasduttori con frequenza di 54 kHz, si è trovato un compromesso tra una adeguata profondità di indagine e una buona definizione dei potenziali difetti.

Le misure ultrasoniche sono state analizzate lungo 10 profili orizzontali distanziati 20 cm l'uno dall'altro (Figura 2.33 a e b). Su ogni profilo sono stati individuati 24 punti stazione, in cui sono state effettuate le misure dei tempi di transito.

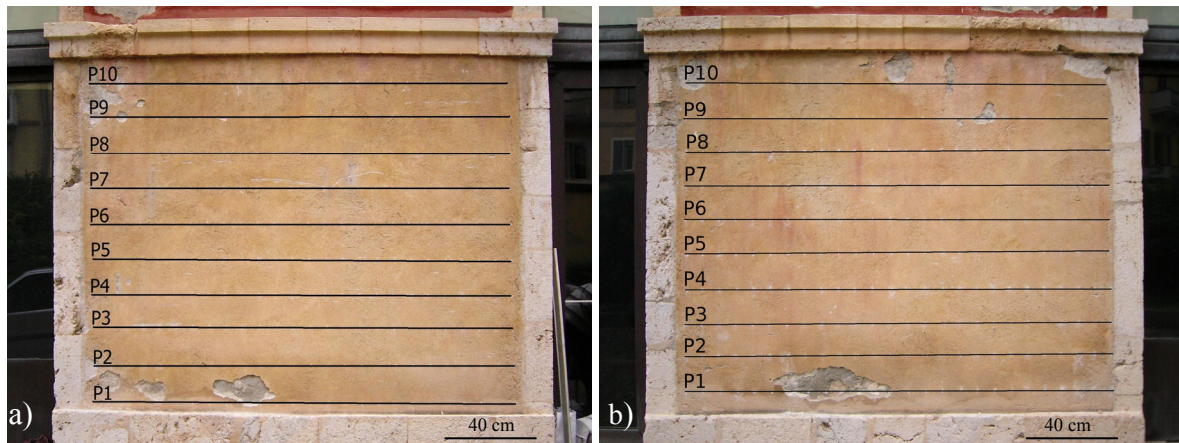


Figura 2.33: Localizzazione dei profili di misura delle velocità ultrasoniche nel pannello 4 (a) e nel pannello 7 (b).

La misura dei tempi di transito dell'impulso ultrasonico longitudinale e delle distanze tra i trasduttori hanno consentito il calcolo delle velocità. Queste ultime, calcolate nei diversi punti, sono state interpolate mediante software dedicato, grazie al quale si sono redatte le mappe di velocità ultrasonica successivamente sovrapposte all'immagine digitale (Figura 2.34 b), al fine di agevolare l'interpretazione.

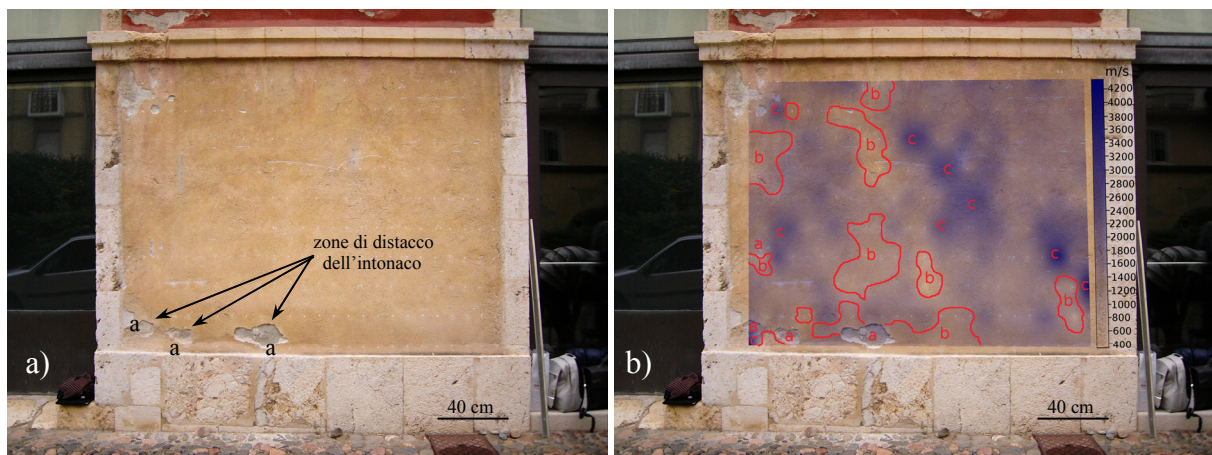


Figura 2.34: (a) immagine digitale del pannello 4; (b) mappa delle velocità ultrasoniche del pannello 4, le zone a bassa velocità sono delimitate dalla isolina di colore rosso e indicate con "b".

Per quanto riguarda l'investigazione effettuata nel pannello 4, dall'osservazione della mappa delle velocità ultrasoniche riportata in figura 2.34 b, si possono notare delle zone a bassa velocità (tra 400 e 1800 m/s, delimitate da linea rossa e indicate con "b"), localizzate sia nelle zone in cui è già visibile l'alterazione (distacchi di intonaco nelle zone indicate con "a" in figura 2.34 a e b) sia nelle zone adiacenti, e presenti soprattutto nella parte inferiore dell'area indagata. Queste aree, sono probabile conseguenza delle discontinuità tra l'intonaco e i blocchi che costituiscono la struttura muraria, degrado provocato, probabilmente, da presenza

di umidità. Tali zone a bassa velocità, individuate mediante l'indagine ultrasonica, sono quelle dove con molta probabilità si accentuerà il degrado con conseguente distacco degli intonaci. Le zone indicate con "c" sono le aree dove si registrano le velocità ultrasoniche più elevate (> 3800 m/s). Tenendo conto delle velocità ultrasoniche ricavate dalle misure di laboratorio per le varie tipologie di *Calcarea di Cagliari*, tali velocità sono paragonabili a quelle tipiche del *Tramezzario*.

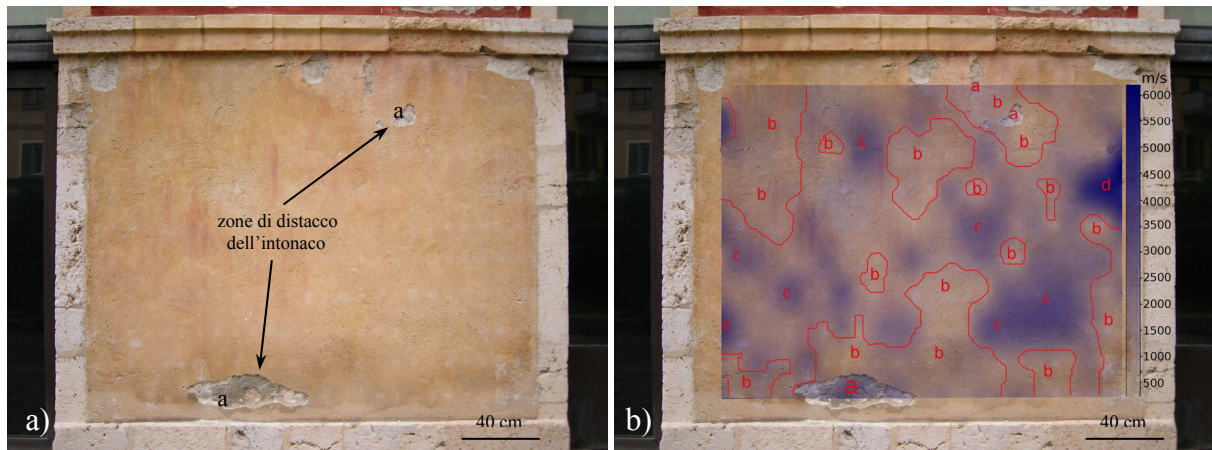


Figura 2.35: (a) immagine digitale del pannello 7; (b) mappa delle velocità ultrasoniche del pannello 7, le zone a bassa velocità sono delimitate dalla isolina di colore rosso e indicate con "b".

Nel pannello 7, come osservabile in figura 2.35 a, si notano alcune zone di distacco dell'intonaco, soprattutto nella parte inferiore. Anche in questo caso, analizzando la mappa di velocità ultrasonica di figura 2.35 b, è possibile osservare delle aree a bassa velocità (tra 500 e 1800 m/s, delimitate da linea rossa e indicate con "b") localizzate sia nelle zone in cui è già visibile l'alterazione (zone indicate con "a" in figura 2.35 a e b) sia nelle zone adiacenti. Queste aree a bassa velocità ultrasonica, numerose e distribuite in tutta la superficie investigata, sono probabile conseguenza dei vuoti presenti sotto l'intonaco. In tali zone, molto probabilmente, il distacco dell'intonaco è imminente e saranno necessari nuovi interventi di restauro. In riferimento alla mappa ultrasonica, nelle zone indicate con "c" si riscontrano velocità ultrasoniche comprese tra i 3500 e i 5000 m/s. Dall'analisi comparata con i dati di velocità ricavati in laboratorio, si ritiene che in tali zone possano essere presenti blocchi di *Tramezzario* sotto l'intonaco. Nell'area indicata con "d" si riscontrano velocità ultrasoniche maggiori di 5500 m/s, ossia velocità paragonabili a quelle determinate in laboratorio per la *Pietra Forte*.

Monitoraggio temporale del pannello 7

Come già accennato nell'introduzione, il pannello 7 è stato oggetto di indagine già nel 2005. Pertanto, è stato possibile osservare l'evoluzione del degrado della parte superficiale del paramento esterno.

Lo studio effettuato nel 2005 era stato eseguito su otto profili (Figura 2.36 a), applicando le modalità di acquisizione precedentemente descritte. Per il rilievo effettuato nel 2011, lo schema di acquisizione è rimasto invariato, fatta eccezione per il fatto che nella parte superiore, sono stati realizzati due ulteriori profili, indicati con P9 e P10 (Figura 2.36 b).

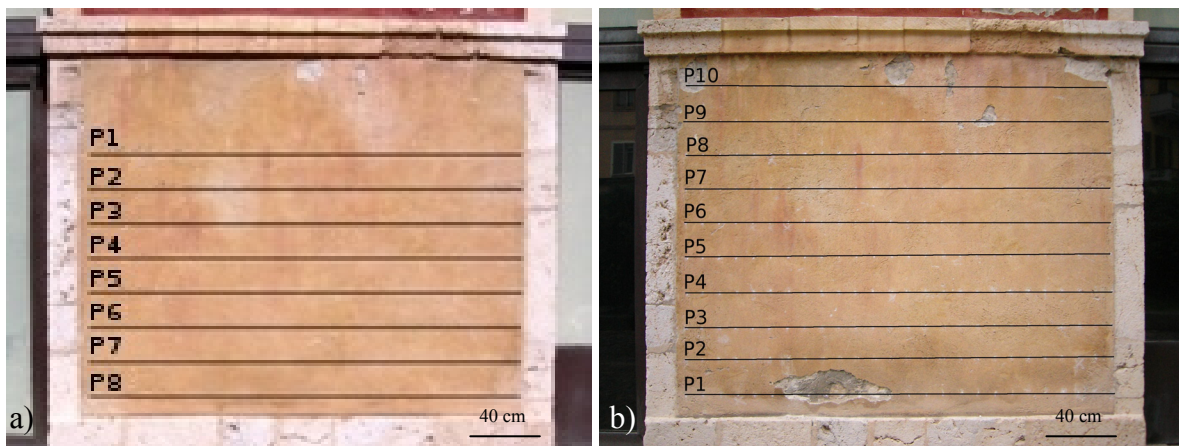


Figura 2.36: Localizzazione dei profili di misura delle velocità ultrasoniche nel pannello 7 nella prima campagna di indagini del 2005 (a) e nella seconda campagna del 2011 (b).

L'analisi della rappresentazione relativa alla distribuzione delle velocità ultrasoniche, ottenuta dal rilievo del 2005, forniva un quadro generale sulle condizioni di degrado della parte superficiale dei materiali costruttivi.

Nella mappa di velocità ultrasonica riportata in figura 2.37, si osservano delle aree a bassa velocità (tra 500 e 1800 m/s, delimitate da linea rossa e indicate con "b") localizzate soprattutto nella parte inferiore dell'area indagata. Si era ipotizzato, già nel 2005, che queste aree a bassa velocità ultrasonica, fossero la conseguenza di vuoti sotto l'intonaco.

Dall'analisi delle velocità rilevate nell'indagine *in situ* e dal confronto di queste con le velocità misurate sui campioni sani in laboratorio, si era osservato che nel paramento in esame erano presenti varie zone con velocità paragonabili a quelle determinate in laboratorio per il *Tramezzario*, con valori di velocità ultrasonica tra 3500 e 5000 m/s (indicate con "c" in figura 2.37).

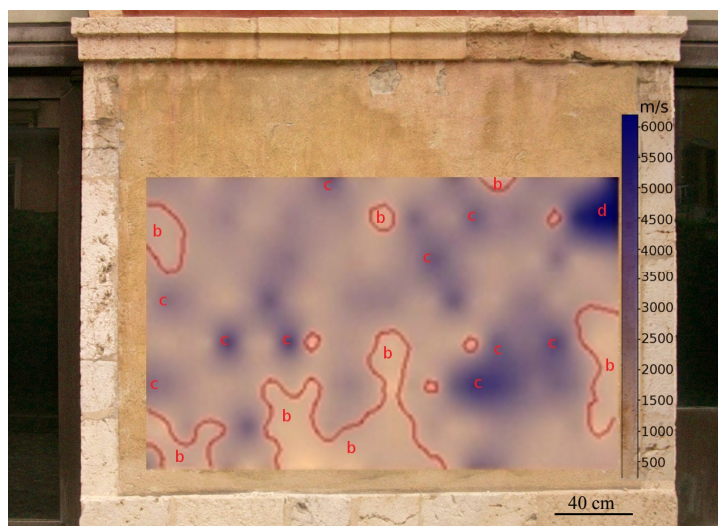


Figura 2.37: Mappa delle velocità ultrasoniche del pannello 7 elaborata nel 2005, le zone a bassa velocità sono delimitate in rosso.

Era rilevabile anche la presenza di una zona ad alta velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici longitudinali, indicata con “d”, nella mappa ultrasonica in figura 2.37. In tale zona si riscontravano velocità ultrasoniche maggiori di 5500 m/s, velocità paragonabili a quelle determinate in laboratorio per la *Pietra Forte*.

Il rilievo del 2011 è stato eseguito per realizzare un monitoraggio temporale del pannello e quindi effettuare un controllo nel tempo delle zone che, già nel 2005, erano caratterizzate da bassi valori di velocità.

Dal confronto tra la mappa redatta nel 2005 (Figura 2.38 a) con quella redatta nel 2011 (Figura 2.38 b) scaturiscono considerazioni di sicuro interesse per l’analisi diagnostica. In particolare, risulta interessante l’area a bassa velocità ultrasonica, indicata in figura 2.38 a con “a”. Quest’area, caratterizzata da basse velocità (tra 500 e 1800 m/s), già nel 2005 era stata considerata critica. Il monitoraggio nel tempo ha confermato la sua criticità. La bassa velocità è infatti conseguenza dello stato di alterazione dei materiali in tale settore del paramento esterno. Tale alterazione si è intensificata nel tempo, provocando il distacco dell’intonaco e di eventuali malte (zona indicata con “a” in figura 2.38 b) che ricoprono i lapidei costituenti la struttura muraria. Questo fenomeno viene inoltre osservato macroscopicamente nei pannelli adiacenti a quello in studio, dove, già nel 2005 era evidente l’avanzato stato di degrado delle parti inferiori delle strutture murarie. Tale degrado si manifestava e si manifesta oggi in maniera ancora più evidente, con il distacco degli strati superficiali di intonaco e disgregazione di ampie zone, probabilmente a causa di una accentuata presenza di umidità, tra lo strato di intonaco e i materiali costruttivi, che perdura ed era già stata ipotizzata nel 2005.

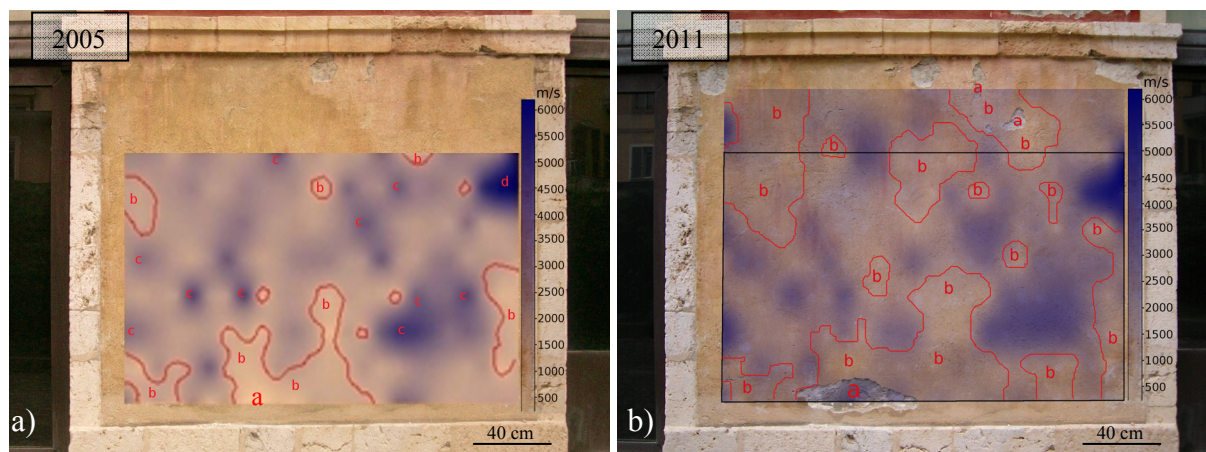


Figura 2.38: (a) mappa delle velocità ultrasoniche del pannello 7 elaborata nel 2005, (b) mappa delle velocità ultrasoniche elaborata nel 2011, l'area delimitata in nero indica l'area investigata nel 2005, le zone a bassa velocità sono delimitate in rosso.

Risulta evidente che gli interventi di restauro effettuati prima del 2005, senza l'ausilio di alcuna tecnica diagnostica, sono stati scarsamente efficaci.

Inoltre, dal confronto delle due mappe del 2005 e del 2011, si può notare come l'estensione delle aree a bassa velocità (indicate con "b") sia aumentata considerevolmente negli anni. Tale fatto è indice di un progressivo stato di degrado del paramento esterno.

Analisi di laboratorio su micro campioni prelevati dai pannelli del paramento esterno del corpo centrale del complesso dell'Exmà'

Analisi calcimetriche

Allo scopo della calibrazione dei dati ultrasonici nei pannelli 4 e 7 del corpo centrale dell'Exmà, sono state effettuate campionature in alcuni punti critici messi in evidenza dall'analisi delle mappe ultrasoniche. Tali campionature hanno interessato sia gli intonaci, sia i lapidei nelle zone di distacco degli intonaci. Su tali campioni, sono state effettuate le analisi calcimetriche.

I campioni di intonaco relativi al pannello 4, sono stati denominati rispettivamente Ei4a e Ei4b, come mostrato nella Figura 2.39.

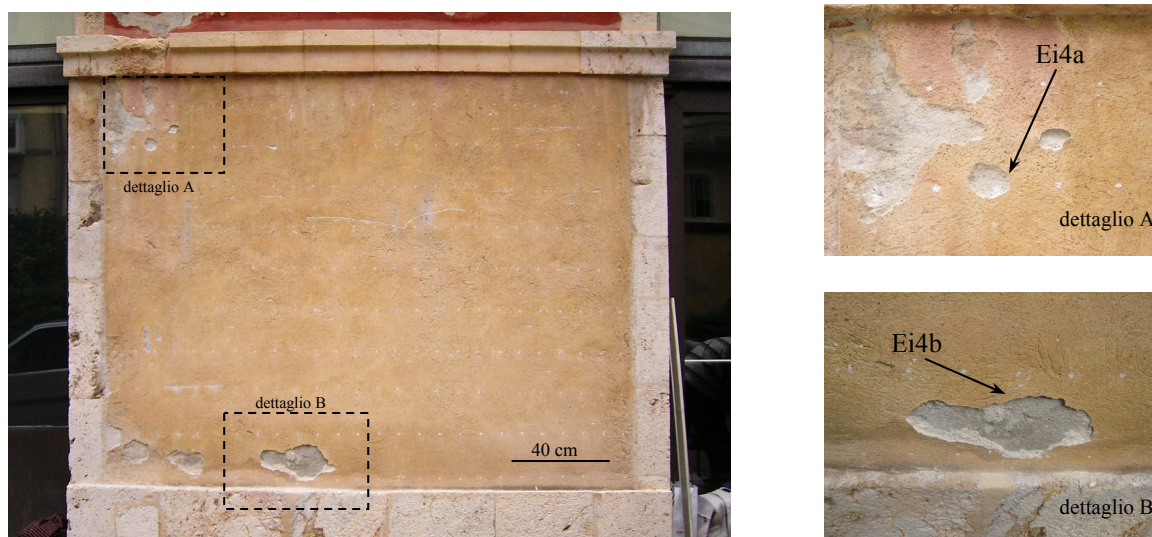


Figura 2.39: Pannello 4, localizzazione dei punti di prelievo dei campioni Ei4a e Ei4b.

Anche i campioni di intonaco del pannello 7, denominati Ei7g e Ei7bc (Figura 2.40) sono stati prelevati in corrispondenza di zone degradate, in particolare dove erano presenti fenomeni di distacco. Il campione Ei7a è stato prelevato da una zona di distacco degli intonaci molto estesa che ha messo in evidenza parte della struttura muraria sottostante ed in particolare alcuni conci con i quali è stata realizzata. Pertanto, tale campione è stato prelevato in corrispondenza di uno dei succitati conci.

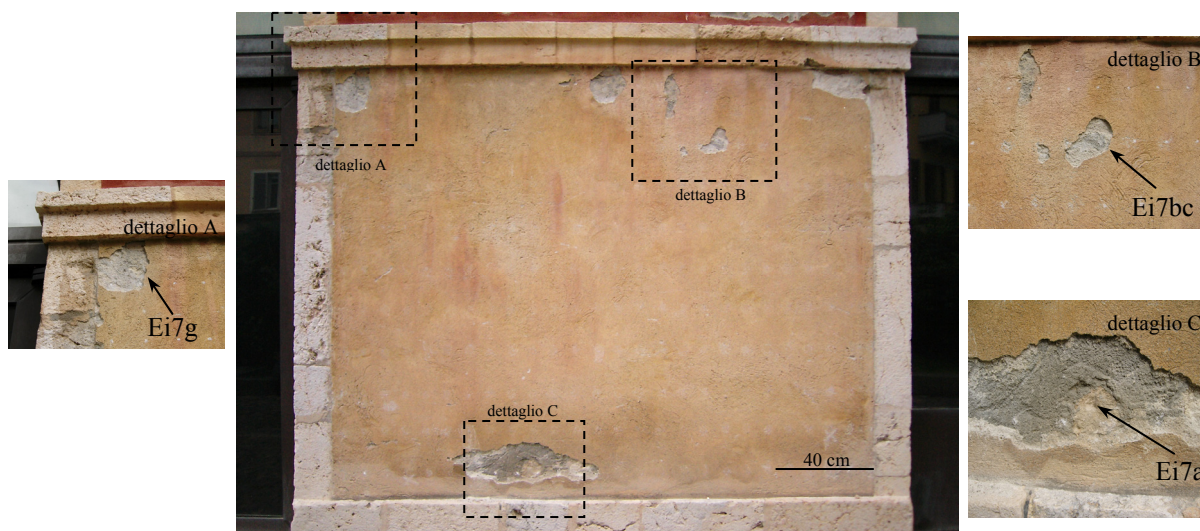


Figura 2.40: Pannello 7, localizzazione dei punti di prelievo dei campioni Ei7a, Ei7bc e Ei7g.

Tutti i campioni prelevati nei pannelli 4 e 7 sono stati analizzati nel contenuto in carbonati e nella tabella 2.12 sono riportati i risultati delle analisi calcimetriche.

<i>Sigla campione</i>	<i>Peso (g)</i>	<i>Lettura calcimetro (mL)</i>	<i>Carbonati (g/Kg)</i>	<i>Carbonati (%)</i>
Ei4a	1	6	23,59	23,6
Ei4b	1	5	19,66	19,7
Ei7a	0,5	118	927,83	92,8
Ei7bc	1	2	7,86	0,8
Ei7g	1	2	7,86	0,8

Tabella 2.12: Contenuto in carbonati dei campioni prelevati dal paramento esterno dell'Exma'.

Come si può osservare nella tabella 2.12, i campioni di intonaco prelevati nel pannello 4 (Ei4a e Ei4b) presentano un contenuto in carbonati rispettivamente del 23,6% e del 19,7%. Pertanto, sulla base di tali risultati, tali campioni possono essere considerati, per quanto riguarda il contenuto in carbonati, molto differenti dai campioni di *Calcare di Cagliari* precedentemente analizzati.

I campioni Ei7bc e Ei7g, prelevati dal pannello 7, hanno un contenuto in carbonati dello 0,8%. Di conseguenza, anche questi campioni, per quanto riguarda il contenuto in carbonati, non presentano affinità con i *Calcari di Cagliari*. Il campione Ei7a, come indicato, è stato prelevato da una zona più profonda, facente parte di uno dei conci che costituiscono la struttura muraria sotto l'intonaco. Dal confronto con i risultati delle analisi calcimetriche riportati in tabella 2.4 nel paragrafo 2.2.3, si osserva che la percentuale in carbonati in questo campione (92,8%), è compresa tra il tenore in carbonati dei campioni di *Tramezzario* (86,5% - 89,6%) e quella dei campioni di *Pietra Forte* (94,3% - 98,3%).

Analisi diffrattometriche

Le analisi diffrattometriche sono state effettuate, in questo contesto, per approfondire la diagnosi dei materiali superficiali dei pannelli 4 e 7 della struttura muraria dell'Exma' e per analizzare le associazioni mineralogiche dei campioni prelevati.

I micro campioni Ei4a, Ei4b (prelevati dal pannello 4) e i campioni Ei7g, Ei7bc (prelevati dal pannello 7), mostrano delle associazioni mineralogiche costituite da calcite, quarzo, gesso, plagioclasio, minerali argillosi e feldspato potassico. A titolo di esempio, in figura 2.41 si illustra il diffrattogramma del campione Ei4b.

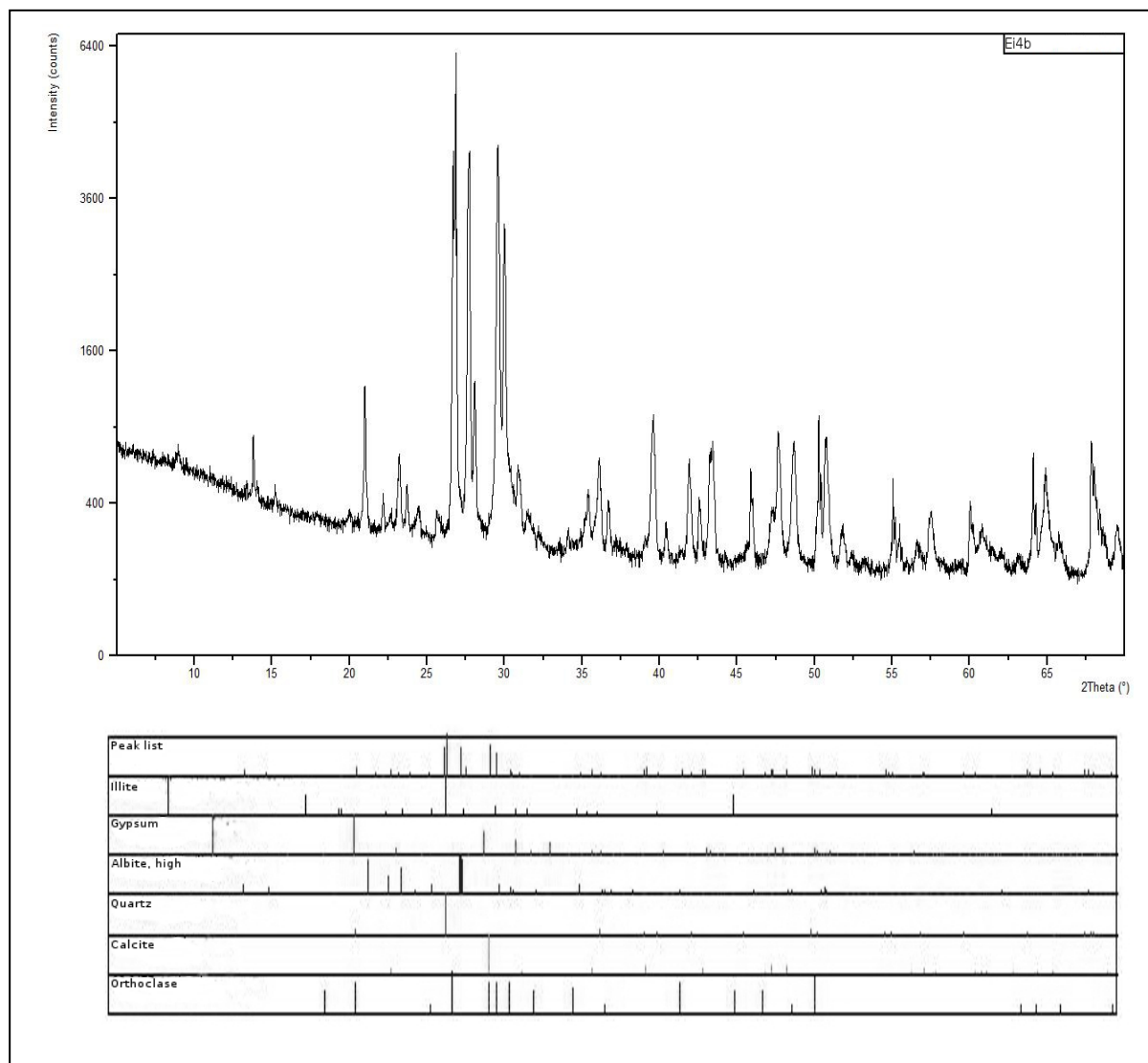


Figura 2.41: Diffratogramma del campione Ei4b.

Il campione Ei7a (proveniente dal pannello 7) (diffratogramma in figura 2.42), mostra una composizione essenzialmente calcitica, di natura paragonabile a quella dei campioni del distretto di Cagliari precedentemente analizzati. Si rammenta che anche nelle calcimetrie effettuate su questo campione, si riscontra una percentuale in carbonati del 92,8 %, valore compreso tra i valori del *Tramezzario* (86,5 - 89,6%) e i valori della *Pietra Forte* (94,3 - 98,3%).

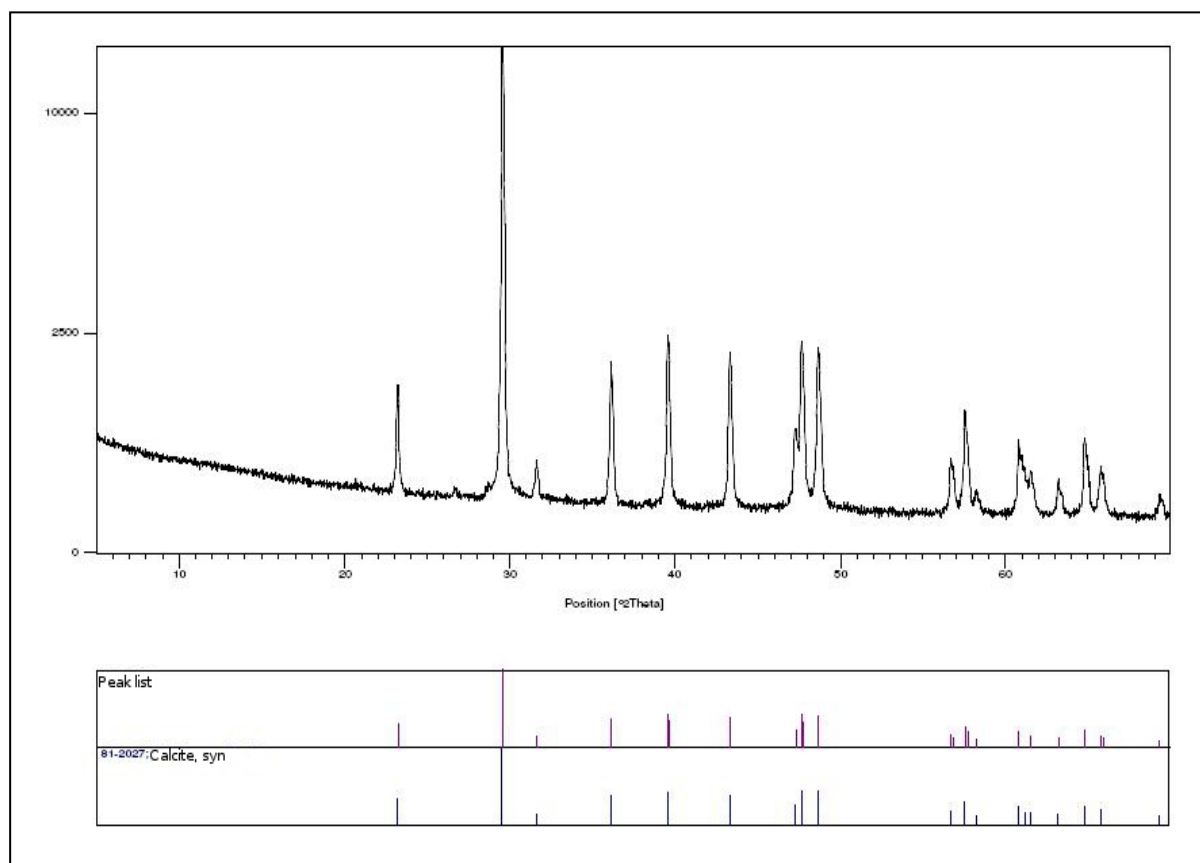


Figura 2.42: Diffrattogramma del campione Ei7a.

Pertanto, sulla base dei risultati delle analisi diffrattometriche, si evidenzia che i campioni provenienti dal paramento esterno dell'Exmà (fatta eccezione per il campione Ei7a) sono intonaci ottenuti miscelando componenti non naturali in proporzioni che variano da campione a campione. In particolare, la composizione degli intonaci è prevalentemente carbonatica (calcite), accompagnata da quantità più o meno elevate di quarzo, minerali accessori presenti sono i k-feldspati e i plagioclasti. Tracce di muscovite o illite (non sempre distinguibile dalla muscovite) quale possibile minerale di alterazione, sono presenti in alcuni campioni degli intonaci analizzati.

Rilievi effettuati nel pilastro del porticato antistante il corpo centrale dell'Exmà

Rilievi ultrasonici

In questo secondo intervento, effettuato su un pilastro facente parte del porticato esterno dell'Exmà, essendo ispezionabili tutte le facce dell'elemento da investigare, sono stati effettuati 5 profili per trasparenza (modalità diretta) tra i suoi lati opposti. Inoltre, sulla

superficie che appariva più degradata (lato A in figura 2.43), si è deciso di effettuare anche un rilievo in modalità indiretta al fine di ottenere una mappa delle velocità ultrasoniche che fornisse elementi conoscitivi sullo stato di conservazione dei materiali superficiali in evidente stato di alterazione. Sullo stesso lato, al fine di completare il quadro diagnostico, si è ritenuto opportuno effettuare un profilo a rifrazione per il controllo di una frattura affiorante che interessava buona parte della superficie investigata.

Rilievi effettuati “per trasparenza”

Le indagini ultrasoniche per trasparenza sono state effettuate secondo due sezioni del pilastro, indicate con “A-A1” e “B-B1” in figura 2.43 a. Sono stati realizzati 3 profili lungo la sezione A-A1 e 2 profili lungo la sezione B-B1 (Figura 2.43 b). Per questo tipo di analisi sono stati utilizzati trasduttori da 24 kHz. Si è utilizzata una frequenza più bassa di quella utilizzata per le analisi in modalità indiretta (54 kHz), in considerazione dello spessore del pilastro e considerando che la profondità di indagine è inversamente proporzionale alla frequenza dei trasduttori.

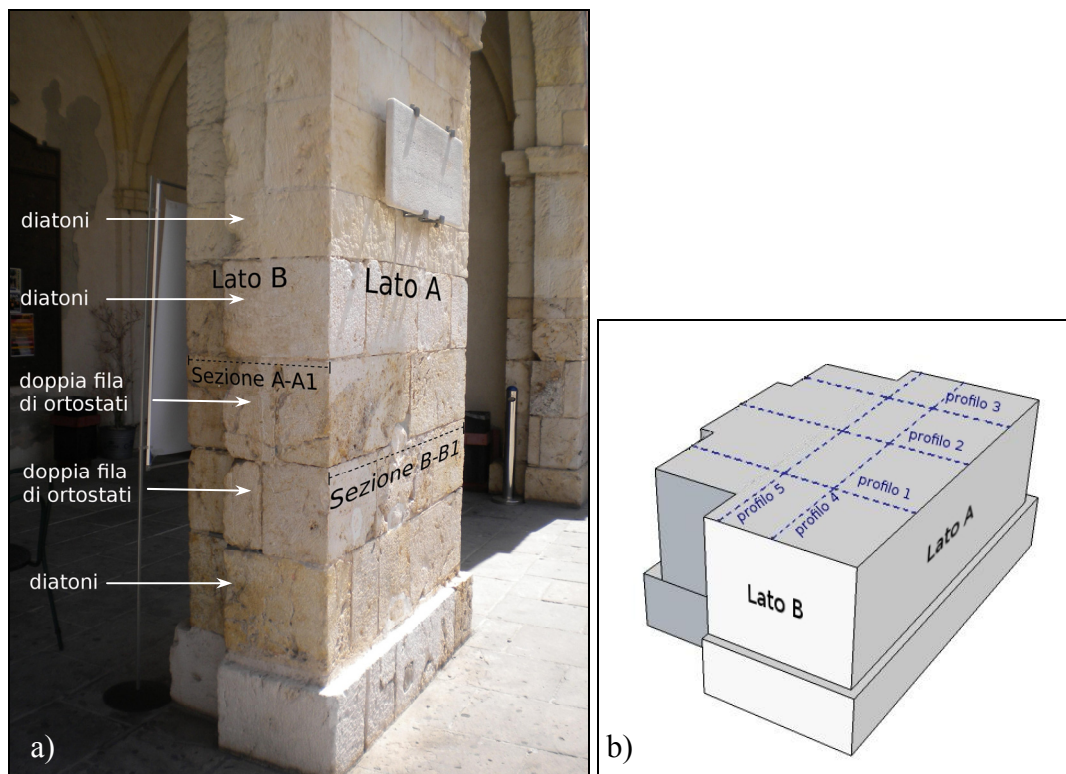


Figura 2.43: (a) disposizione dei conci del pilastro nelle diverse direzioni; (b) vista semplificata del pilastro in sezione e localizzazione dei profili ultrasonici per trasparenza.

Osservando il pilastro, è possibile fare delle osservazioni sulla disposizione dei blocchi che lo compongono. I conci sono squadri (“opus quadratum”), la tessitura è a corsi orizzontali, in opera pseudoisodoma (i blocchi sono di dimensioni differenti e disposti in corsi di altezze diseguali). I giunti sono sfalsati tra i corsi ma disposti irregolarmente. Osservando il pilastro dal basso verso l’alto (escludendo i blocchi del basamento e fino al quinto corso), si alternano un corso di conci disposti nel senso della profondità (diatoni) secondo la direzione A-A1 (Figura 2.43 a), due corsi di conci disposti nel senso della lunghezza (ortostati) secondo la direzione della sezione B-B1 e altri due corsi di diatoni. Nel senso della profondità del pilastro (osservando il pilastro di fronte al lato A), le file di ortostati sono doppie. Le file dei diatoni sono invece singole. La sezione trasversale risulta quindi “a due paramenti ammorsati”. L’osservazione sulla disposizione dei blocchi, in questo caso è importante, in quanto nei rilievi effettuati per trasparenza, la velocità dell’impulso ultrasonico è influenzata non solo dalle possibili zone di alterazione del materiale, ma anche dalla presenza dei giunti tra i conci che costituiscono la struttura del pilastro. Questi giunti costituiscono delle discontinuità, e quindi, delle zone dove la velocità dell’impulso ultrasonico diminuisce. Nei casi estremi in cui i giunti non sono a contatto, si creano delle discontinuità in cui il transito degli impulsi ultrasonici può essere ostacolato.

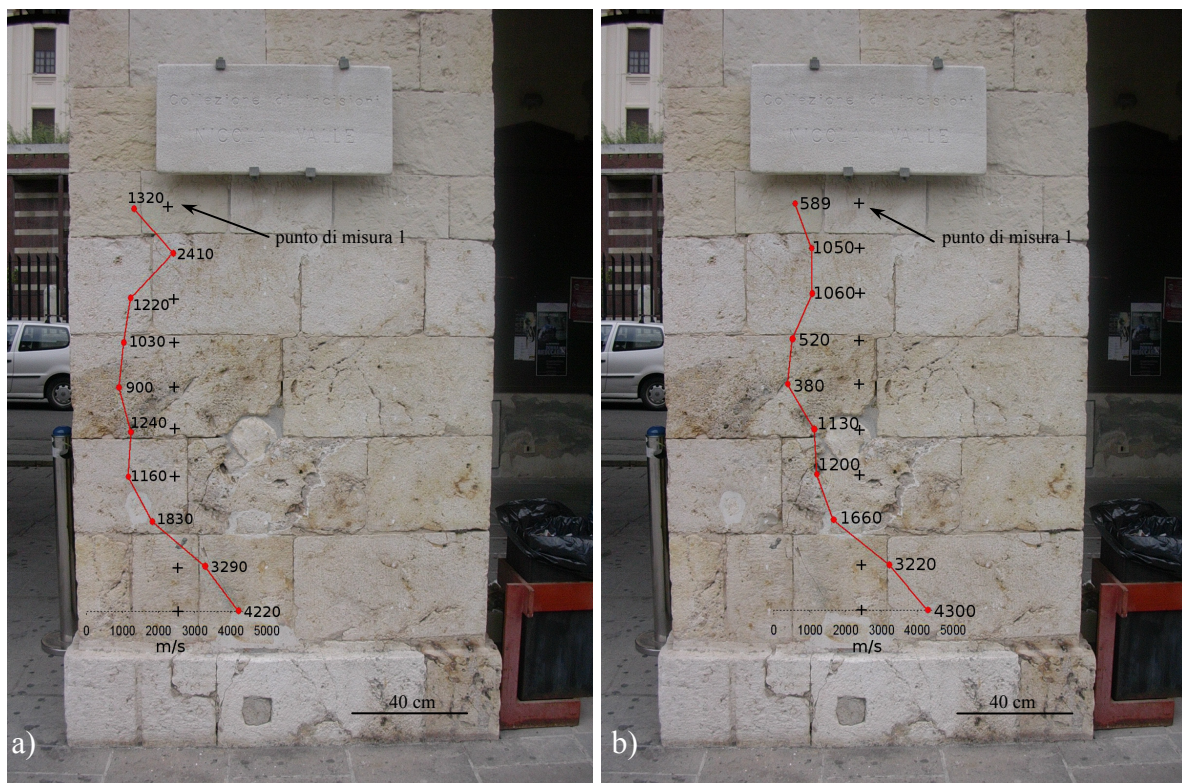


Figura 2.44: Lato A del pilastro: (a) andamento della velocità ultrasonica lungo il profilo 1 e (b) lungo il profilo 2; +: punti di misura.

Osservando il trend delle velocità ultrasoniche lungo il profilo 1, ottenuto dall'interpolazione dei valori rilevati in ogni punto di osservazione (Figura 2.44 a), si può notare come nei punti di misura 9 e 10 (partendo dall'alto), si verifichi un notevole incremento delle velocità ultrasoniche (3290 - 4220 m/s). Questi punti di misura sono localizzati in un corso di diatoni singoli, pertanto non sono presenti giunti nel percorso dell'impulso ultrasonico tra trasmettitore e ricevitore. Considerando anche la natura dei materiali e confrontando questi valori di velocità con i valori di velocità ultrasonica determinati in laboratorio per i campioni delle varie tipologie di calcare in studio, si può osservare che i conci attraversati dall'impulso ultrasonico in questi ultimi punti di misura presentano velocità ultrasoniche comparabili con quelle del *Tramezzario*. I punti di misura dal 4 al 8 (Figura 2.44 a) sono localizzati in corrispondenza dei conci che fanno parte di due corsi di ortostati posti in fila doppia. Quindi è da considerare che nel tragitto dell'impulso ultrasonico è sempre presente un giunto tra due file di conci. Tale giunto, oltre a una possibile alterazione dei materiali visibile anche alla superficie dei conci, è quasi sicuramente la causa del decremento della velocità ultrasonica (800 – 1830 m/s) in questo settore del pilastro. Nei punti di misura dal 1 al 3, posizionati in due conci che fanno parte di due corsi di diatoni singoli, si osserva un lieve incremento delle velocità ultrasoniche (1220 – 2410 m/s), probabilmente a causa della mancanza di giunti nel percorso dell'impulso ultrasonico dal trasmettitore al ricevitore. Tuttavia, in questo caso, considerando che non ci sono discontinuità tra i conci, si può dedurre che questi valori di velocità, che sono comunque di gran lunga inferiori rispetto a quelli misurati in laboratorio per le stesse tipologie di calcare che costituiscono la struttura, siano correlati con la presenza di vuoti, zone di frattura o alterazione entro i conci.

Osservando il profilo 2 (Figura 2.44 b), si nota un trend delle velocità molto simile a quello del profilo 1. Pertanto, per questo profilo valgono le stesse considerazioni fatte per il profilo 1.

Anche nel profilo 3, per i punti di misura 9 e 10 (Figura 2.45), posizionati nel primo corso in basso di conci diatoni, si riscontrano velocità ultrasoniche più elevate (1830 e 3140 m/s) rispetto a quelle rilevate negli altri punti stazione. Nei punti di misura 1 e 2, posizionati in conci diatoni singoli, si sono riscontrate velocità ultrasoniche (rispettivamente di 860 e 980 m/s) leggermente superiori rispetto a quelle rilevate nei punti di misura posizionati nei conci che fanno parte delle doppie file di ortostati (punti 4 – 8), in cui, come precedentemente detto, sono presenti dei giunti nel percorso dell'impulso ultrasonico dal trasmettitore al ricevitore.

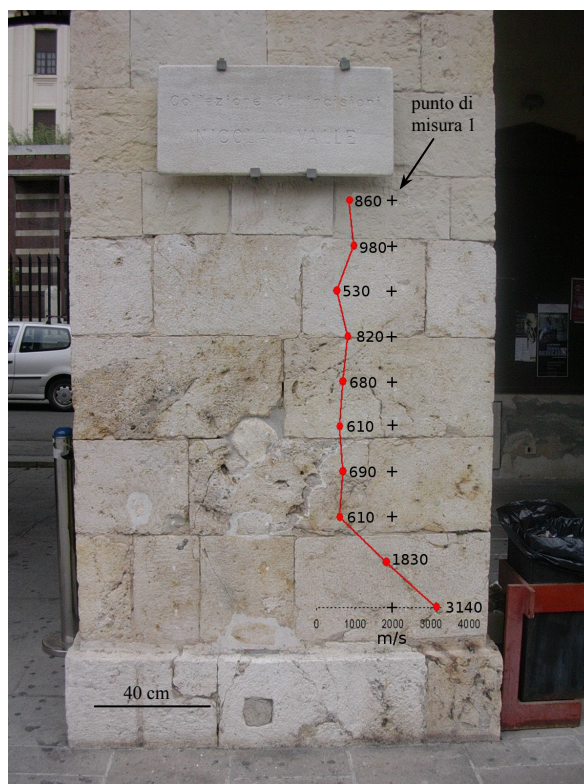


Figura 2.45: Lato A del pilastro: andamento della velocità ultrasonica lungo il profilo 3; +: punti di misura.

Per il punto di misura numero 3, anch'esso posizionato in un concio diatonico singolo, si è calcolata una velocità ultrasonica di 530 m/s, inferiore rispetto a tutte le altre misure. Pertanto, anche in questo caso è verosimile che il concio in questione presenti al suo interno discontinuità o zone di alterazione che influenzano la velocità di propagazione dell'impulso ultrasonico.

Nella sezione B-B1 del pilastro in studio (Figura 2.43 a e b), sono stati effettuati due profili in modalità diretta (per trasparenza) (Figura 2.46 a e b), tra loro paralleli e distanziati di 15 cm. Le velocità ultrasoniche calcolate in corrispondenza dei punti di osservazione dei due profili, sono caratterizzate da valori compresi nel range 580 – 1400 m/s. Tra tutti i conci attraversati dall'impulso ultrasonico, sono sempre presenti diversi giunti (Figura 2.43 a), in direzione ortogonale rispetto al percorso trasmettitore-ricevitore, che rappresentano delle discontinuità e determinano un incremento dei tempi di transito dell'impulso ultrasonico e di conseguenza un decremento delle velocità.

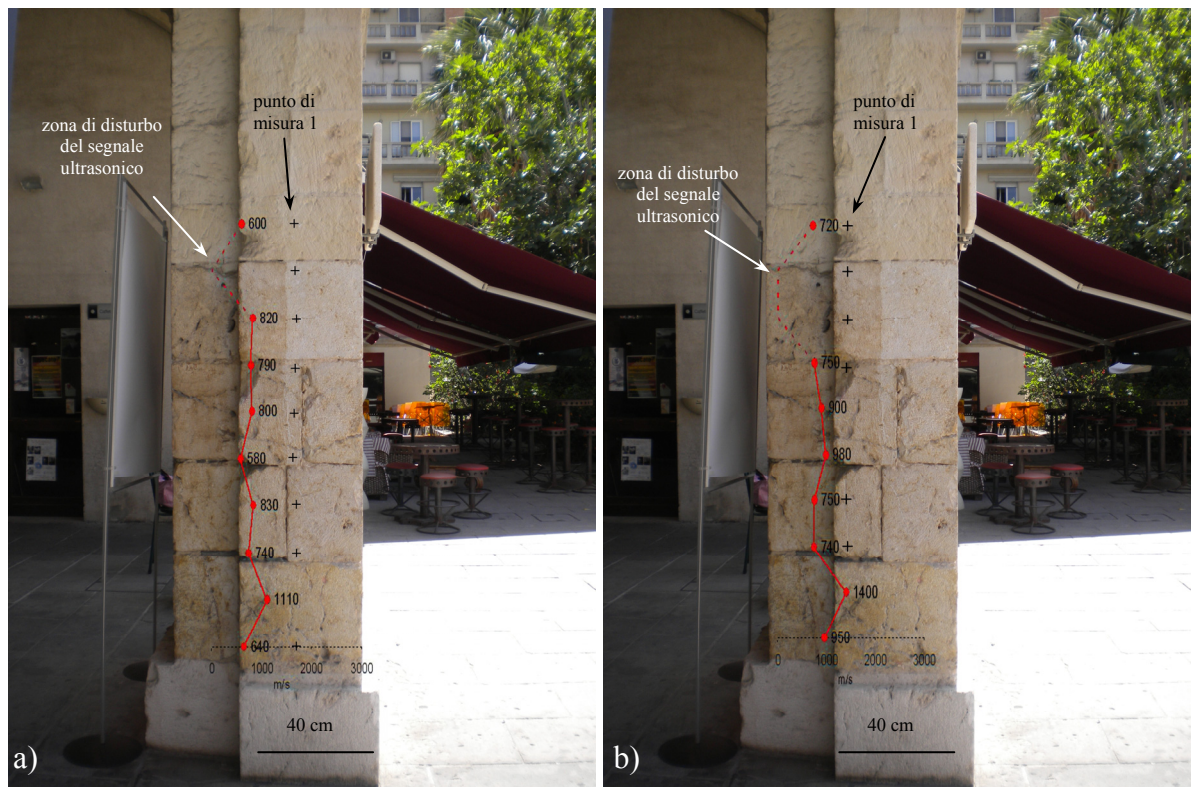


Figura 2.46: Lato B del pilastro: (a) andamento della velocità ultrasonica lungo il profilo 4; (b) lungo il profilo 5; +: punti di misura.

Nei profili 4 e 5 in figura 2.46 a e b, si notano delle zone in cui i profili di velocità sono riportati in tratteggio. In queste zone, oltre alla presenza dei giunti lungo il percorso dell'impulso ultrasonico che influenzano la propagazione del segnale ultrasonico, sono sicuramente presenti delle zone di discontinuità o comunque zone con scarse caratteristiche elastiche (peraltro ipotizzate anche nell'analisi dei profili 1, 2 e 3 negli stessi corsi attraversati dall'impulso ultrasonico) che rendono instabili i valori dei tempi di transito dell'impulso ultrasonico. Pertanto in tali zone non è stato possibile effettuare misure affidabili.

Rilievo effettuato in modalità indiretta

Allo scopo di approfondire le indagini sullo stato di conservazione dei materiali superficiali in corrispondenza del lato "A" del pilastro, che appariva il più degradato, si è deciso di effettuare un rilievo in modalità indiretta con utilizzo di trasduttori da 54 kHz. Le misure ultrasoniche sono state realizzate, mantenendo l'offset costante a 20 cm, lungo 8 profili orizzontali distanziati 20 cm l'uno dall'altro. Su ogni profilo sono stati individuati 11 punti di misura (Figura 2.47).



Figura 2.47: Schema di acquisizione dei dati ultrasonici in modalità indiretta nel lato “A” del pilastro.

Osservando la mappa della distribuzione delle velocità ultrasoniche riportata in figura 2.48, si possono notare delle zone a bassa velocità (< 2400 m/s), indicate con “a”. Queste zone sono prevalentemente localizzate in corrispondenza dei giunti tra i conci che costituiscono il pilastro, dove, probabilmente, il materiale di allettamento si è alterato. Tali zone di alterazione dei materiali (che rappresentano delle discontinuità), possono essere messe in relazione anche con le basse velocità calcolate nei due profili 4 e 5, effettuati in modalità diretta nella sezione B-B1 del pilastro (Figura 2.46 a e b). L’analisi integrata dei dati porta a pensare che tali discontinuità non siano limitate agli strati superficiali ma proseguano in profondità.

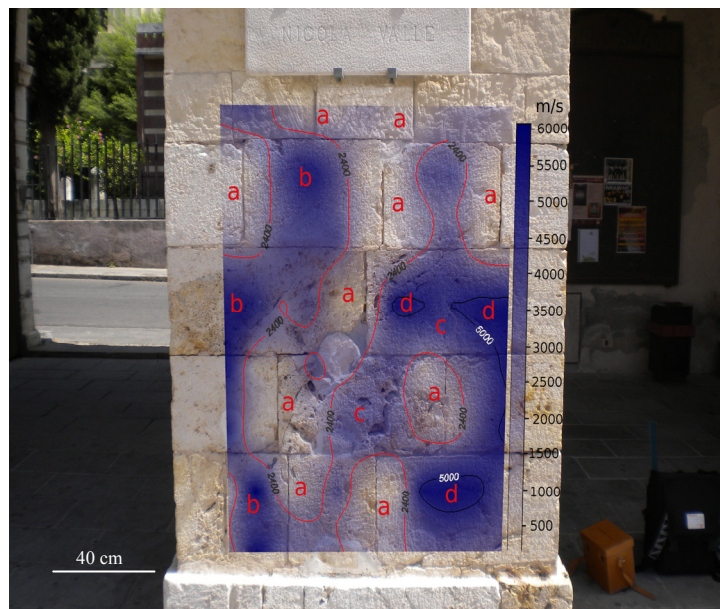


Figura 2.48: Mappa delle velocità ultrasoniche dei materiali superficiali del pilastro, le zone a bassa velocità sono delimitate dalla isolina di colore rosso indicate con “a”.

Le due aree indicate con “c” sono le zone in cui le velocità ultrasoniche inferiori ai 2400 m/s non sono localizzate in corrispondenza dei giunti ma nelle zone centrali di due conci. In questo caso, la zona a bassa velocità ultrasonica che si osserva nel secondo corso (dal basso verso l’alto) di blocchi è dovuta ad un evidente degrado, anche superficiale, del materiale costituente il concio. La seconda zona a bassa velocità ultrasonica, (anch’essa indicata con “c”) presente nel terzo corso, è dovuta ad una frattura presente nel concio. Questa zona di frattura sarà oggetto di approfondimento nel paragrafo seguente.

Sempre in riferimento alla mappa di velocità ultrasonica in figura 2.48, le zone che sono indicate con “b” sono zone in cui i materiali costruttivi presentano velocità ultrasoniche dai 3500 ai 5000 m/s e quindi possono essere considerati in buone condizioni elastiche e in buono stato di conservazione, così come le zone in cui si sono riscontrate velocità superiori ai 5000 m/s. Le zone a più alta velocità ultrasonica (> 5000 m/s), indicate con “d”, sono le zone in cui il materiale è in ottime condizioni elasto-meccaniche e di conservazione.

Analisi di laboratorio su micro campioni prelevati dal pilastro del porticato antistante il corpo centrale dell’Exmà

Dall’analisi dei dati ultrasonici acquisiti nelle strutture monumentali in studio, si sono ottenute delle importanti indicazioni sulla localizzazione di eventuali punti di campionatura da cui prelevare, ove possibile, dei micro campioni per la calibrazione dei dati ultrasonici.

Nella tabella 2.13 sono riportati i contenuti in carbonati dei campioni analizzati.

<i>Sigla campione</i>	<i>Peso (g)</i>	<i>Lettura calcimetro (mL)</i>	<i>Carbonati (g/Kg)</i>	<i>Carbonati (%)</i>
PF.ex1	0,5	120	952,53	95,3
PF.ex2	0,5	119	960,54	96,1
Tr.ex1	0,5	110	880,49	88
Tr.ex2	0,5	111	888,50	88,8
Tr.ex3	0,5	110	880,49	88

Tabella 2.13: Contenuto in carbonati dei campioni prelevati nel pilastro del porticato dell’Exmà’.

Per effettuare il confronto tra contenuto in carbonati e velocità ultrasoniche, sono state realizzate delle campionature di velocità in prossimità dei punti di prelievo, utilizzando la tecnica di acquisizione indiretta con *offset* di 20 cm e trasduttori da 54 kHz. Le velocità ultrasoniche determinate in corrispondenza dei punti di prelievo dei campioni (Figura 2.49) sono risultate pari a: 5620 m/s (campione PF.ex1 – *Pietra Forte*) e 5700 m/s (campione

PF.ex2 – *Pietra Forte*); 3900 m/s (campione Tr.ex1 – *Tramezzario*), 4700 m/s (campione Tr.ex2 – *Tramezzario*) e 4200 m/s (campione Tr.ex3 – *Tramezzario*).

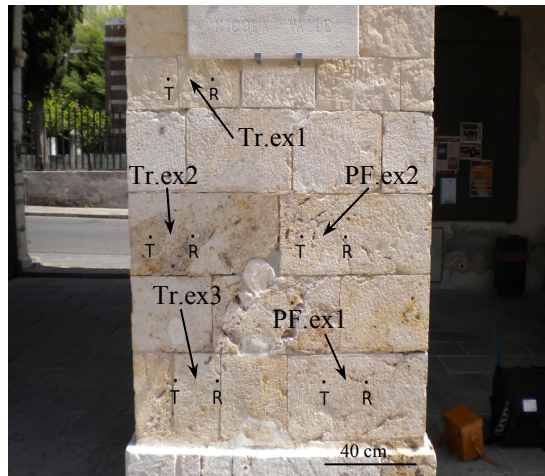


Figura 2.49: Pilastro del porticato dell’Exma’: localizzazione dei punti di prelievo dei campioni per le analisi calcimetriche e delle campionature di velocità ultrasonica (T = trasmettitore; R = ricevitore).

Seguendo la sequenza metodologica già usata nelle analisi di laboratorio illustrate nel paragrafo 2.2.3, si è ritenuto d’interesse ai fini della ricerca, comparare i risultati delle calcimetrie (Tabella 2.8) con i dati ottenuti dalle campionature di velocità. Nel grafico in figura 2.50 è illustrato il trend delle velocità al variare del contenuto in carbonati nei campioni dei materiali costituenti il paramento esterno delle strutture investigate.

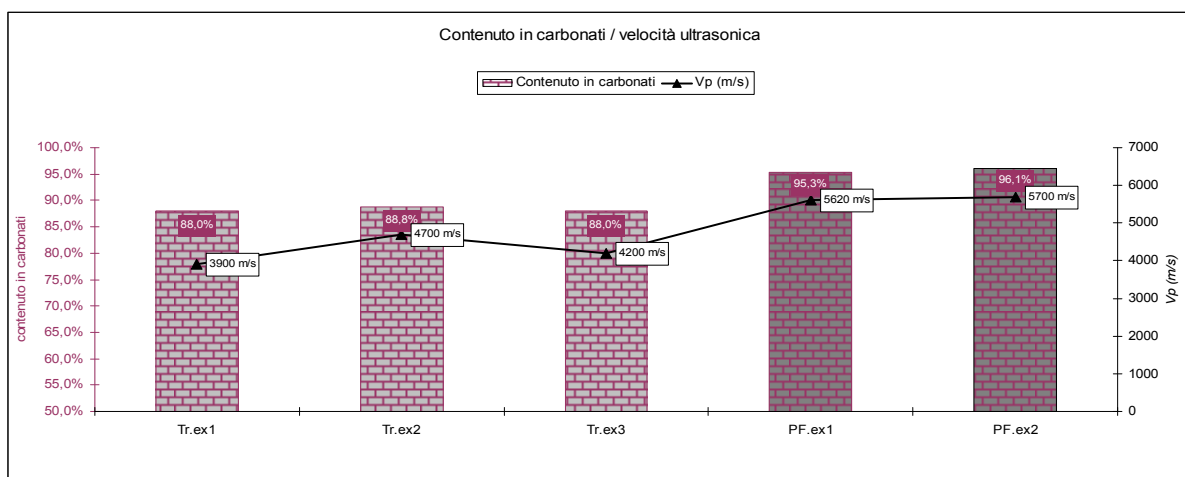


Figura 2.50: Trend delle velocità ultrasoniche al variare del contenuto in carbonati nei campioni.

Dall’analisi del grafico riportato in figura 2.50, si può notare che le velocità ultrasoniche aumentano con l’aumentare del contenuto in carbonati.

Analisi della tessitura muraria

In figura 2.51 si riporta l'analisi della tessitura muraria deducibile dall'esame della mappa di velocità ultrasonica, dal suo confronto con i dati ricavati in laboratorio sia sui campioni sani delle varie tipologie dei *Calcari di Cagliari*, sia dai dati di laboratorio relativi ai campioni prelevati dalle strutture murarie in studio.



Figura 2.51: Analisi della tessitura muraria: (a) conci con velocità ultrasonica paragonabile a quella della *Pietra Forte*; (b) conci con velocità ultrasonica paragonabile a quella del *Tramezzario*; (c) zone con cemento o malta; (d) spazi vuoti compresi entro i conci o tra i giunti.

Nelle rappresentazioni riportate in figura 2.51 (a – d) sono indicate le varie tipologie di materiale caratterizzato da diverse velocità ultrasoniche. Le zone indicate in figura 2.51 c, sono interessate dalla presenza di cementi o malte, in molti casi utilizzati per effettuare interventi di restauro; le zone indicate in figura 2.51 d, sono caratterizzate da vuoti, compresi entro i conci o tra i giunti.

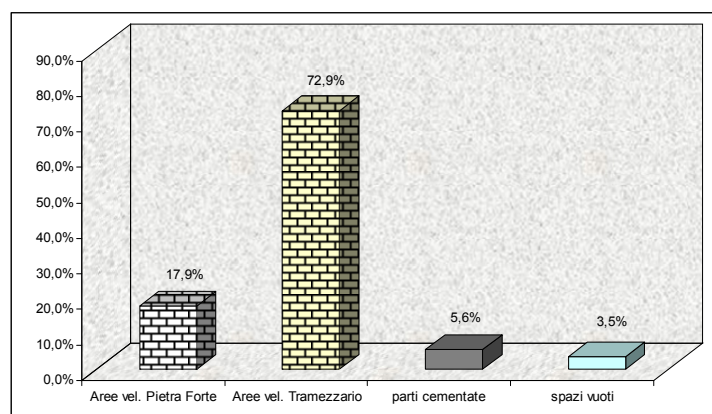


Figura 2.52: Istogramma dell'estensione in percentuale di elementi che costituiscono la struttura investigata, dedotta dall'analisi ultrasonica in sito integrata con i dati ultrasonici di laboratorio.

Nell'istogramma in figura 2.52 viene illustrata l'estensione in percentuale delle aree con diverse caratteristiche di velocità ultrasonica abbinata ai diversi materiali costruttivi. Si osserva che l'elemento strutturale investigato è composto in gran parte (72,9%) da zone con velocità ultrasonica paragonabile a quella del *Tramezzario*. Tale deduzione è stata suffragata dalle calcimetrie effettuate sui micro campioni prelevati per la calibrazione dei dati in laboratorio (Tabella 2.13).

Profilo a rifrazione effettuato in una zona di frattura affiorante

Al fine di approfondire il quadro diagnostico dei materiali superficiali del lato "A" del pilastro, si è ritenuto opportuno effettuare il controllo di una frattura affiorante, individuata mediante la preliminare analisi macroscopica. Tale frattura interessa buona parte della superficie investigata ed è stata evidenziata anche nella mappa di distribuzione della velocità ultrasonica (Figura 2.53 a e b). Pertanto, nella zona interessata dalla frattura si è effettuato un profilo "a rifrazione" con una tecnica di acquisizione simile a quella utilizzata nelle prospezioni sismiche a rifrazione che si eseguono per le indagini del sottosuolo.

In questa analisi si è operato ponendo il trasmettitore Ta in un punto fisso del pilastro e ponendo il ricevitore in posizioni successive distanziate tra loro di 10 cm ad *offset* (distanza trasmettitore-ricevitore) crescenti, come indicato in figura 2.53 c. Successivamente è stato realizzato un profilo coniugato invertendo la posizione dei punti di trasmissione del segnale. Il trasduttore trasmettitore è stato posto nella posizione Tb (speculare a Ta) e il trasduttore ricevitore nelle posizioni R4, R3, R2, R1 e Ta in successione.

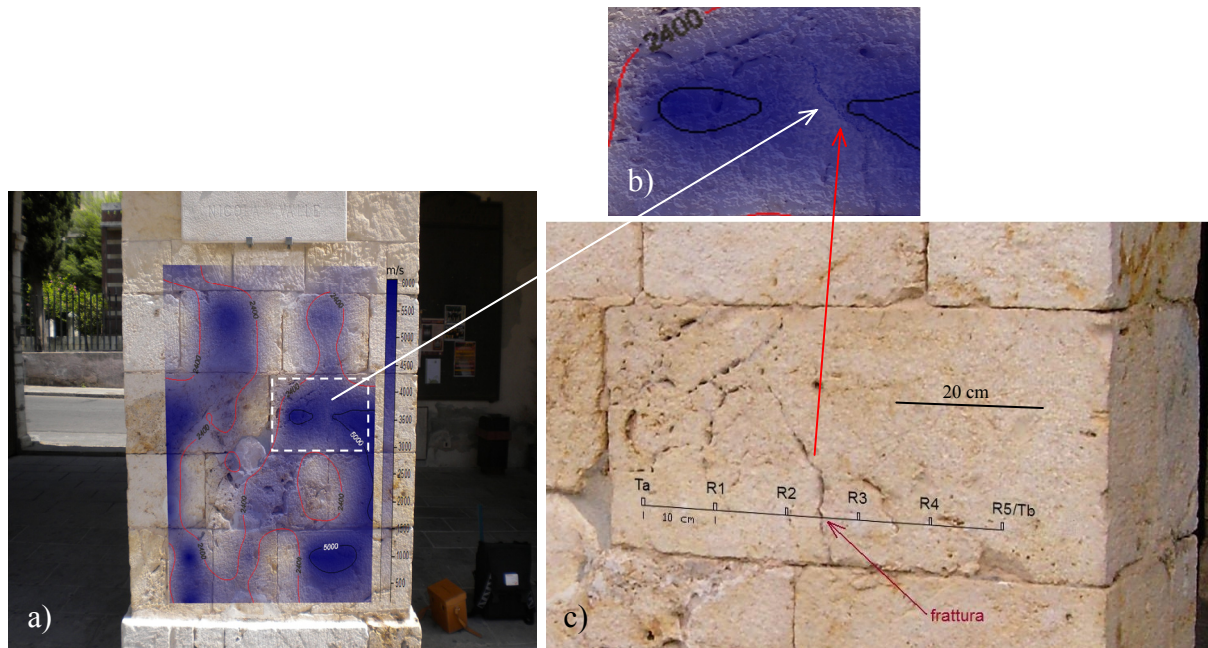


Figura 2.53: Frattura analizzata mediante profilo a rifrazione; (a) mappa di velocità ultrasonica, (b) dettaglio della mappa di velocità ultrasonica, (c) schema di acquisizione del profilo a rifrazione.

In questo modo, seguendo le modalità operative della sismica a rifrazione, è stato possibile costruire il diagramma delle “dromocrone coniugate” riportato in figura 2.54 e analizzare la profondità della frattura (Jensen, 1996). Per il controllo della profondità della frattura si è

utilizzata la formula: $h = \frac{L}{2} \left(\frac{T2}{T1} - \frac{T1}{T2} \right)$, che applicata al presente caso, risulta:

$$h = \frac{25\text{cm}}{2} \left(\frac{41,5\mu\text{s}}{39,5\mu\text{s}} - \frac{39,5\mu\text{s}}{41,5\mu\text{s}} \right) = 1,25 \text{ cm.}$$

La frattura analizzata, risulta avere una profondità di

1,25 cm, pertanto non si sviluppa in profondità ma interessa solo il paramento esterno.

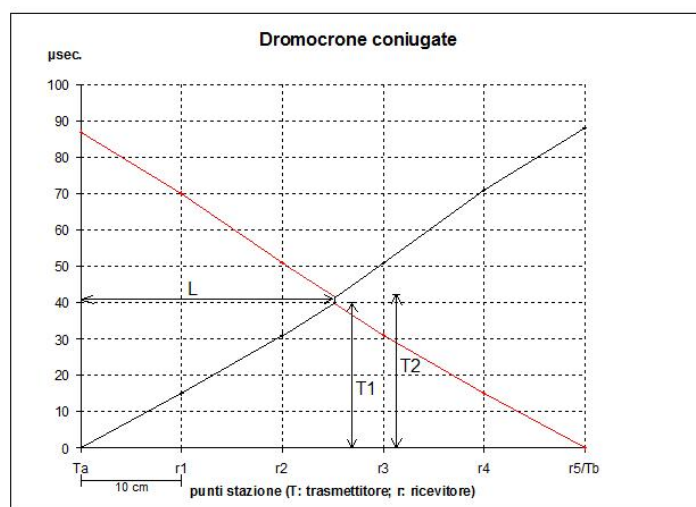


Figura 2.54: Diagramma delle dromocrone coniugate, utilizzato per l’analisi della profondità della frattura.

2.3.3 Torre di San Pancrazio

I rilievi effettuati nella Torre di San Pancrazio hanno interessato una parte del paramento esterno della struttura che si affaccia verso Est e che presentava segni di degrado. Per effettuare un'analisi approfondita delle caratteristiche elastiche dei materiali costitutivi, in questo settore, dove si osservano blocchi costituiti da diverse facies, sono state effettuate indagini ultrasoniche e termografiche.

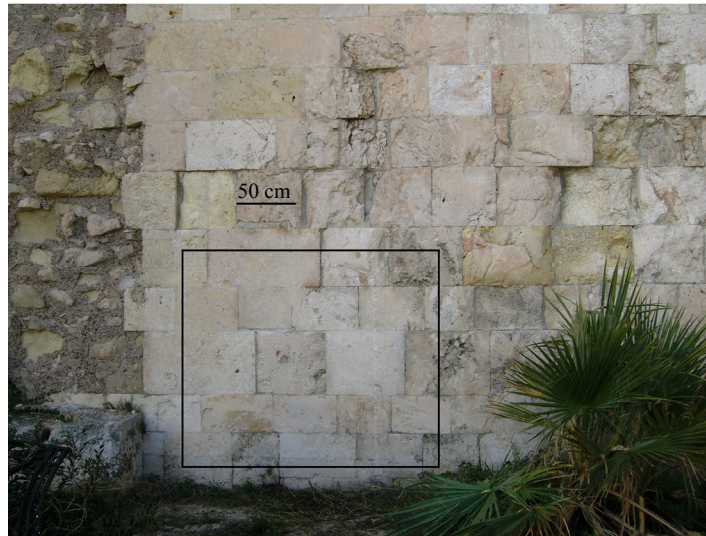


Figura 2.55: Area del paramento esterno della Torre di San Pancrazio sottoposta ad analisi ultrasonica.

L'analisi ultrasonica è stata effettuata con un rilievo di superficie (in modalità indiretta), anche al fine di acquisire informazioni sul paramento esterno, i cui materiali, in alcuni punti, apparivano in uno stato di conservazione non ottimale. L'analisi termografica è stata effettuata in modalità passiva, sfruttando l'insolazione che, nelle ore diurne, interessa la superficie in studio.

Nella porzione di struttura muraria indagata (Figura 2.55), i conci costituenti sono squadri ("opus quadratum"). La tessitura è a corsi orizzontali in opera pseudoisodoma (i blocchi sono di varie pezzature, disposti in corsi di altezze diseguali, ogni corso ha una sua altezza fissa). I giunti sono sfalsati tra i corsi e disposti irregolarmente.

Analisi ultrasoniche

Nel settore di muratura investigata, si è ritenuto interessante individuare ed eventualmente mappare possibili disomogeneità mediante l'analisi delle variazioni di velocità di propagazione del segnale ultrasonico. Tali disomogeneità danno luogo a zone di discontinuità che favoriscono i processi di degrado. Nell'analisi diagnostica, la relatività delle misure di

velocità viene riferita ad un valore medio determinato in laboratorio su campioni sani delle stesse litologie costituenti la struttura muraria.

Per l'acquisizione dei dati ultrasonici sono stati tracciati 5 profili di misura, distanziati di 50 cm. Per ogni profilo sono stati individuati 23 punti stazione. Le misure sono state effettuate con la modalità indiretta e la tecnica di acquisizione *step by step* mantenendo l'offset a 15 cm (Figura 2.56).

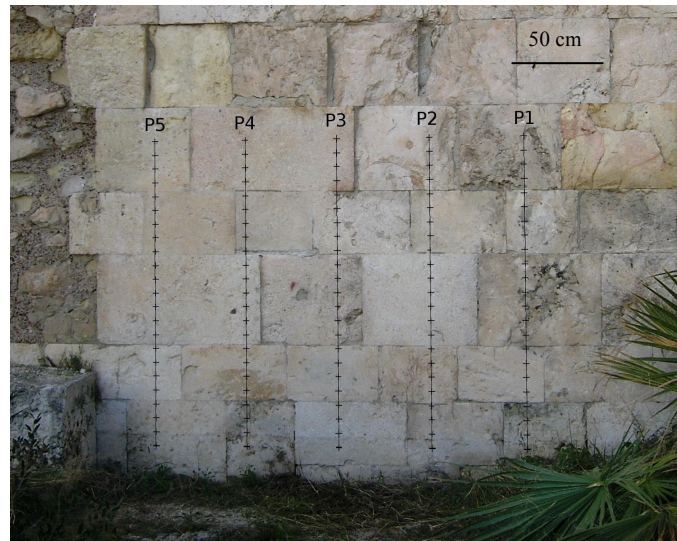


Figura 2.56: Localizzazione dei profili ultrasonici nel settore di paramento in studio.

Per le misure ultrasoniche è stata utilizzata la stessa strumentazione impiegata per le misure effettuate all'Exma'. Anche in questo caso, è stato possibile calcolare la velocità di propagazione dei segnali ultrasonici nei materiali, conoscendo le distanze tra i trasduttori e misurando il tempo di transito del segnale che si propaga dal trasmettitore al ricevitore. L'interpolazione dei valori di velocità calcolati nei diversi punti stazione ha consentito di ricostruire la distribuzione della velocità delle onde P nel settore di struttura investigata (Figura 2.57).

Nella mappa di velocità ultrasonica riportata in figura 2.57, si possono osservare delle zone a bassa velocità (< 2000 m/s, indicate con "a"), in queste zone sono presenti dei vuoti nel materiale di allettamento tra i conci costituenti il paramento. Per cui, questi vuoti, presenti in diverse zone di giunzione tra i blocchi costituenti, provocano un abbassamento della velocità di transito degli impulsi ultrasonici in diverse zone del paramento esterno.

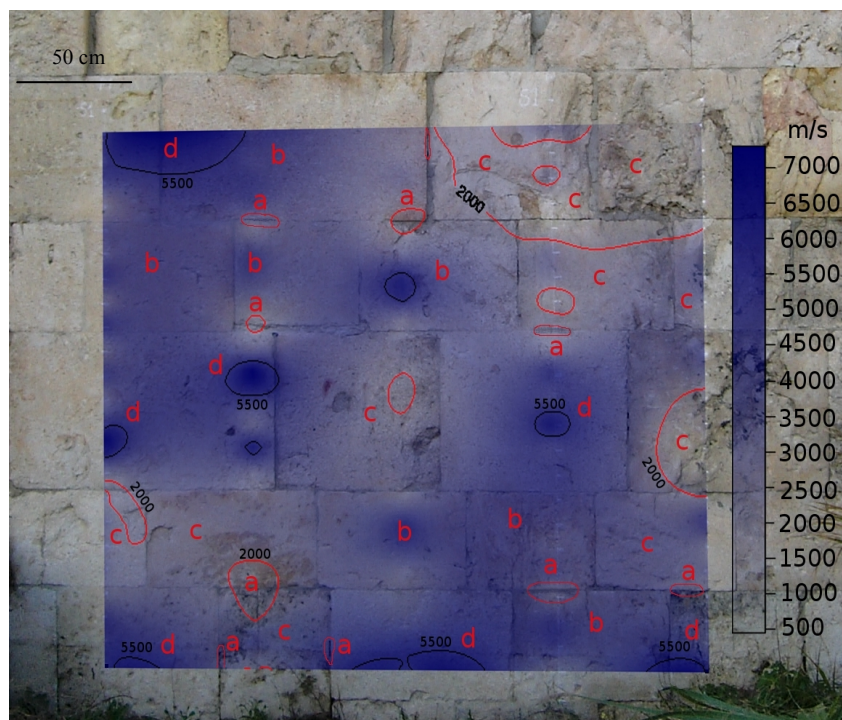


Figura 2.57: Mappa delle velocità ultrasoniche, le zone a bassa velocità sono delimitate dalla isolina di colore rosso e indicate con “a”.

Le aree indicate con “c” sono le zone (non localizzate in una zona di giunto), in cui le velocità ultrasoniche sono le più basse (≤ 2000 m/s). Confrontando questi valori di velocità con i valori di velocità ultrasonica calcolati in laboratorio per i campioni delle varie tipologie di calcare in studio, possiamo dire che tali zone sono caratterizzate da velocità che non raggiungono i valori tipici della *Pietra Cantone* (2960 m/s in modalità indiretta, utilizzando trasduttori da 54 kHz). Per cui risulta evidente che queste zone sono in condizioni elastiche non ottimali.

Le zone che nella mappa di velocità ultrasonica in figura 2.57 sono indicate con “b” presentano velocità ultrasoniche che raggiungono i 5500 m/s e, pertanto, rappresentano le zone in cui i conci sono in buone condizioni elasto-meccaniche.

Le zone dove si riscontrano le velocità ultrasoniche più elevate (> 5500 m/s), indicate con “d” sono le zone in cui il materiale è in ottime condizioni elastiche.

Analisi comparata termografica e ultrasonica

Le analisi termografiche sono state eseguite per analizzare lo stato di conservazione dei materiali superficiali, indagando sulle possibili correlazioni con le mappe ultrasoniche. L'analisi termografica, eseguita in modalità passiva, è stata effettuata nella stessa zona dove si è realizzata l'analisi ultrasonica. La termocamera utilizzata in questo caso è una NEC TH 9260, le cui caratteristiche tecniche sono riportate nella tabella 2.14.

Campo visivo (H×V)	21,7°×16,4°
Detector	Microbolometrico
Lunghezza d'onda	8-14 μm
Risoluzione Spaziale - IfoV -	0.6 mRad
Temperatura minima percepibile (MRT)	0.06° C a 30° C (30 Hz)
Focusing	Da 30 cm a ∞
Visual camera	1,3 Mpixels, color
Output del segnale video	NTSC/PAL, S-video
Range misurabile	-40° to +500° C

Tabella 2.14: Caratteristiche tecniche della termocamera NEC TH 9260.

Nell'analisi dei termogrammi è necessario tenere conto che l'emissività è influenzata anche dalle caratteristiche di rugosità dei materiali. Quindi, prima di analizzare il termogramma, è stato necessario individuare tutte le zone dell'area studiata che presentano una superficie molto scabra. Tali zone sono indicate, nel termogramma riportato in figura 2.58 a, con "e".

Confrontando il termogramma con la mappa ultrasonica, si possono notare le analogie tra i risultati delle due tecniche (la mappa delle velocità ultrasoniche in figura 2.58 b è una porzione della mappa ultrasonica già riportata in figura 2.57).

Nel termogramma riportato in figura 2.58 a, si può notare che la distribuzione delle temperature è molto simile alla distribuzione delle velocità ultrasoniche della mappa ultrasonica in figura 2.58 b. Quindi, le aree con diverse caratteristiche elastiche, individuate mediante tecnica ultrasonica, hanno anche diverse caratteristiche termiche.

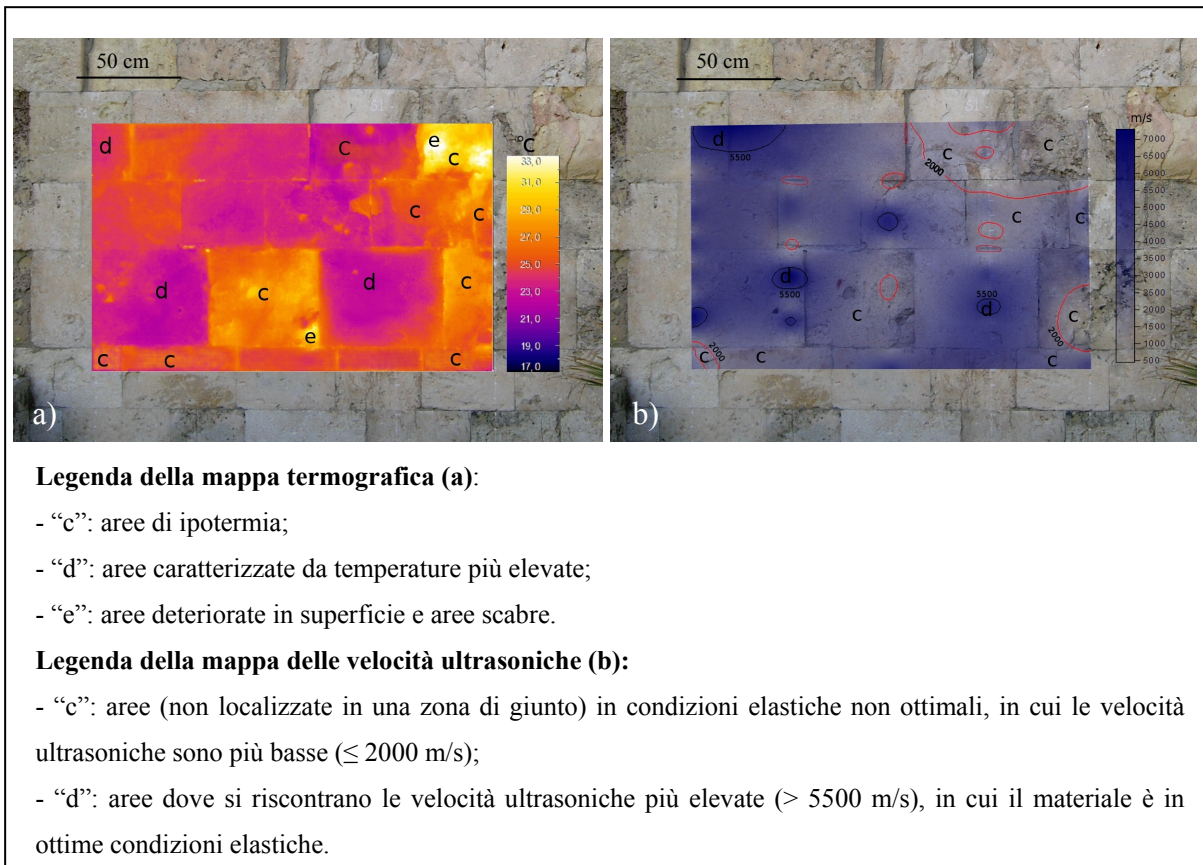


Figura 2.58: (a) termogramma della struttura muraria, (b) mappa delle velocità ultrasoniche.

La tecnica termografica, in questo caso, ci fornisce un'importante conferma sulle differenze nelle caratteristiche dei materiali costituenti l'oggetto analizzato che possono influenzare anche lo stato di conservazione delle strutture investigate. Possiamo quindi affermare che le due tecniche possono essere utilizzate in combinazione in maniera proficua.

Analisi di laboratorio su micro campioni prelevati dal paramento esterno della Torre di San Pancrazio

Analisi calcimetriche

Per determinare il contenuto in carbonati nei litotipi utilizzati quali materiali costruttivi nel paramento esterno della Torre di San Pancrazio, sono stati analizzati alcuni campioni prelevati nella parete del monumento che si affaccia verso Est (Figura 2.59).

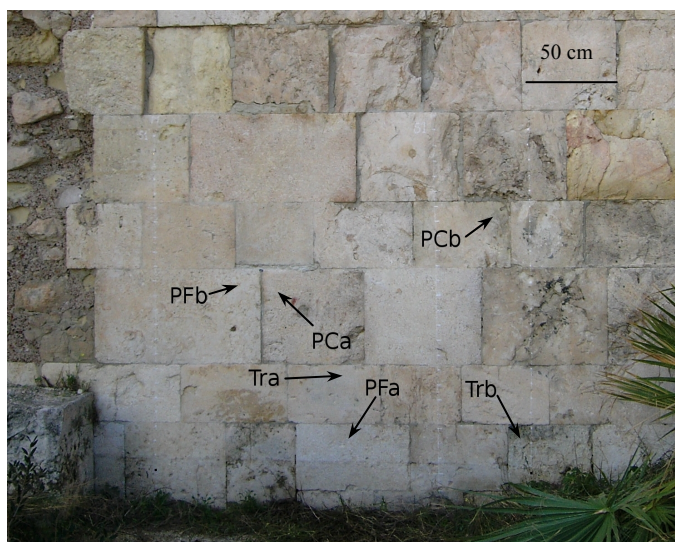


Figura 2.59: Localizzazione delle campionature effettuate nella Torre di San Pancrazio.

Tali campioni sono stati utilizzati per le misure calcimetriche, nella tabella 2.15 sono riportati i contenuti in carbonati dei succitati campioni.

<i>Sigla campione</i>	<i>Peso (g)</i>	<i>Lettura (mL)</i>	<i>Carbonati (g/Kg)</i>	<i>Carbonati (%)</i>
PCa	0,5	110	864,93	86,5
PCb	0,5	109	857,06	85,7
Tra	0,5	113	888,52	88,9
Trb	0,5	114	896,38	89,6
PFa	0,5	130	982,87	98,3
PFb	0,5	130	998,60	99,8

Tabella 2.15: Contenuto in carbonati dei campioni del paramento esterno della Torre di San Pancrazio.

Anche in questo caso, si è ritenuto d'interesse ai fini della ricerca, comparare i risultati delle calcimetrie (Tabella 2.15) con i dati ottenuti dalle campionature di velocità, effettuate negli stessi punti di campionatura utilizzando la tecnica di acquisizione indiretta con *offset* di 15 cm e trasduttori da 54 kHz. Le velocità ultrasoniche riscontrate sono risultate pari a: 3500 m/s (zona di prelievo del campione PCa – *Pietra Cantone*) e 3050 m/s (zona di prelievo del campione PCb – *Pietra Cantone*); 4440 m/s (zona di prelievo del campione Tra – *Tramezzario*) e 4490 m/s (zona di prelievo del campione Trb – *Tramezzario*); 6250 m/s (zona di prelievo del campione PFa – *Pietra Forte*) e 7140 m/s (zona di prelievo del campione PFb – *Pietra Forte*).

I contenuti in carbonati sono stati correlati con le misure di velocità. Nel grafico in figura 2.60 è illustrato il trend di tali velocità al variare del contenuto in carbonati nei litotipi presi in esame.

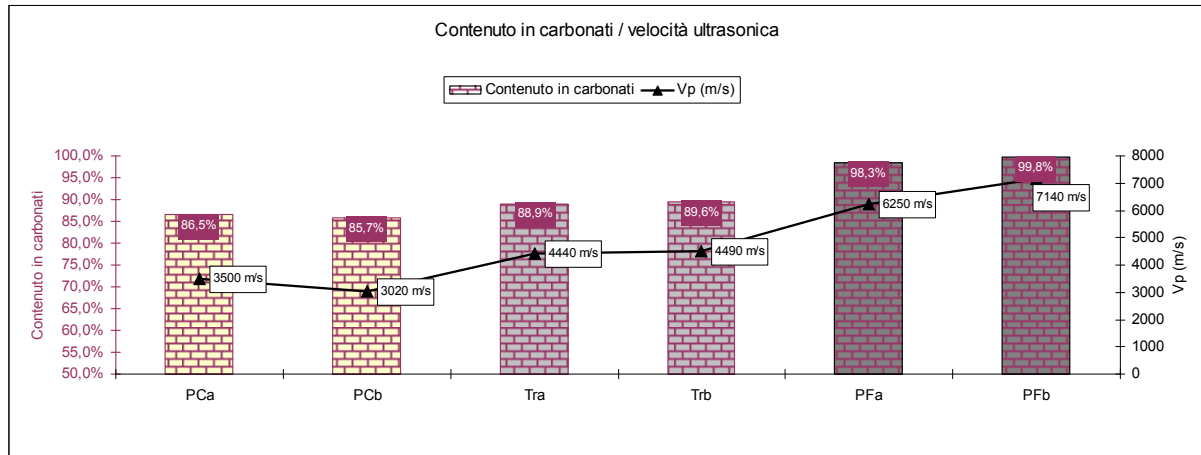


Figura 2.60: Trend delle velocità ultrasoniche longitudinali al variare del contenuto in carbonati nei campioni in studio.

Come si può notare dall'analisi del grafico, il *trend* delle velocità ultrasoniche, misurate nelle zone dove sono stati prelevati i campioni, mostra un incremento all'aumentare del contenuto in carbonati.

Analisi diffrattometriche

Le analisi diffrattometriche nei campioni prelevati nel paramento esterno della Torre di San Pancrazio (PCa, PCb, Tra, Trb, PFa e PFb) evidenziano tutte una composizione monomineralogica calcitica, come si osserva nel diffrattogramma riportato in figura 2.61 (diffrattogramma del campione PFb).

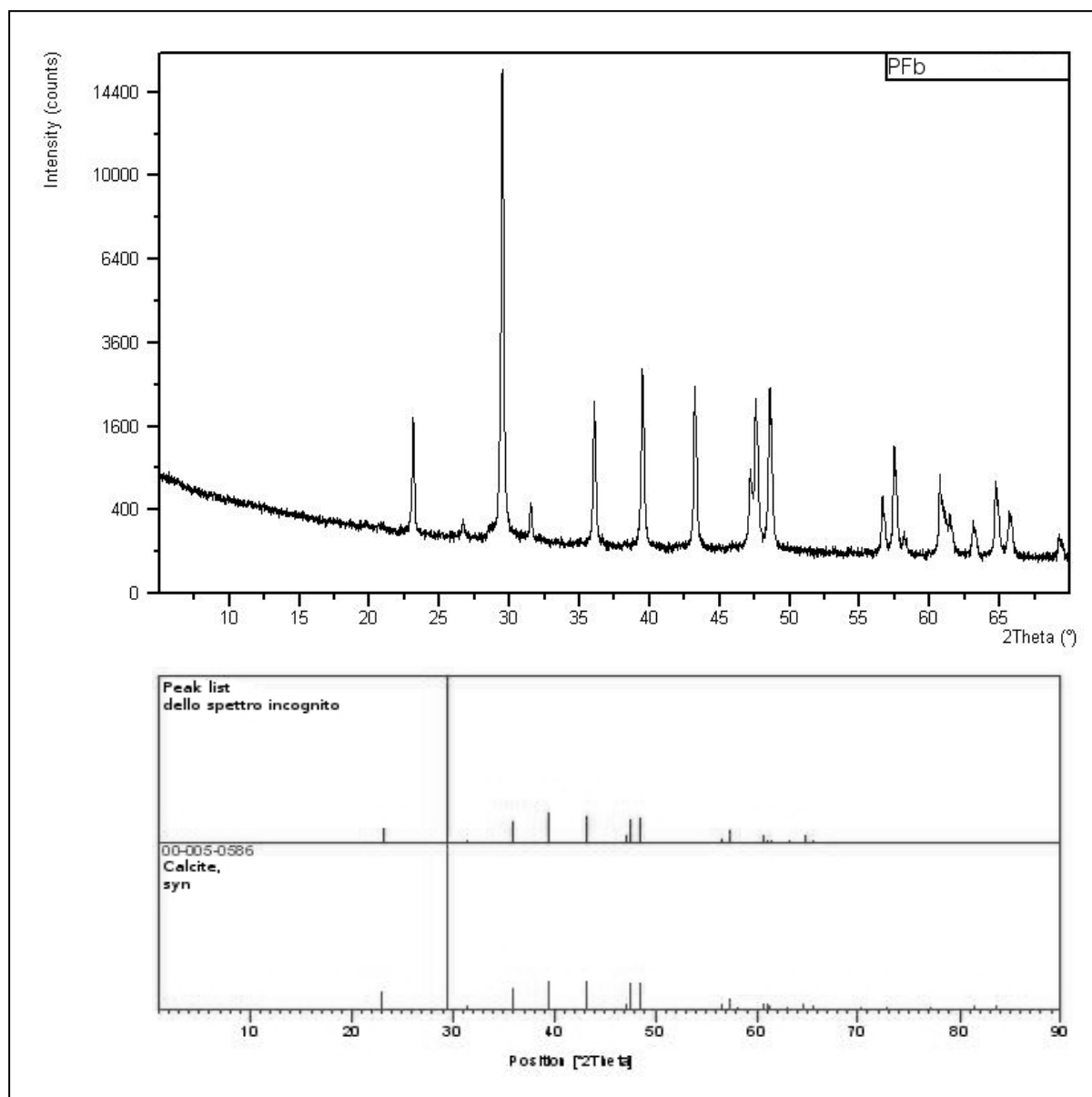


Figura 2.61: Diffratogramma del campione PFb.

L'analisi diffrattometrica conferma che i campioni di roccia analizzati sono riferibili a litologie di tipo carbonatico, in quanto il minerale presente è sempre la calcite.

Analisi della tessitura muraria

L'analisi comparata della mappa ultrasonica, dei valori di velocità ultrasonica calcolati in laboratorio per i campioni delle varie tipologie di *Calcere di Cagliari* e dei dati di laboratorio relativi ai campioni prelevati dalla struttura muraria in studio, ha permesso di effettuare l'analisi della tessitura muraria (Figura 2.62).

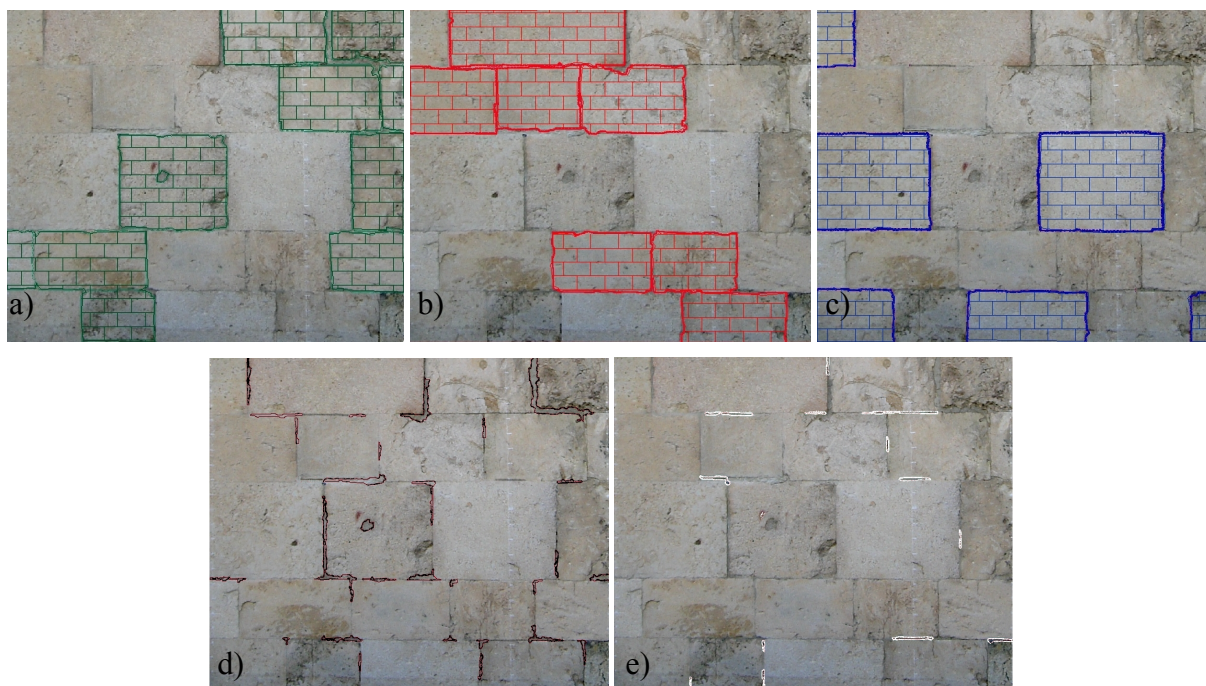


Figura 2.62: Analisi della tessitura muraria: (a) conci con velocità inferiore a quella della *Pietra Cantone*; (b) conci con velocità paragonabili a quelle del *Tramezzario*; (c) conci con velocità paragonabili a quelle della *Pietra Forte*; (d) zone con cemento o malta; (e) spazi vuoti tra i giunti.

È stato possibile, quindi, individuare la natura litologica dei materiali, il cui riconoscimento macroscopico non sempre era attuabile, trattandosi di materiali esposti agli agenti meteorici.

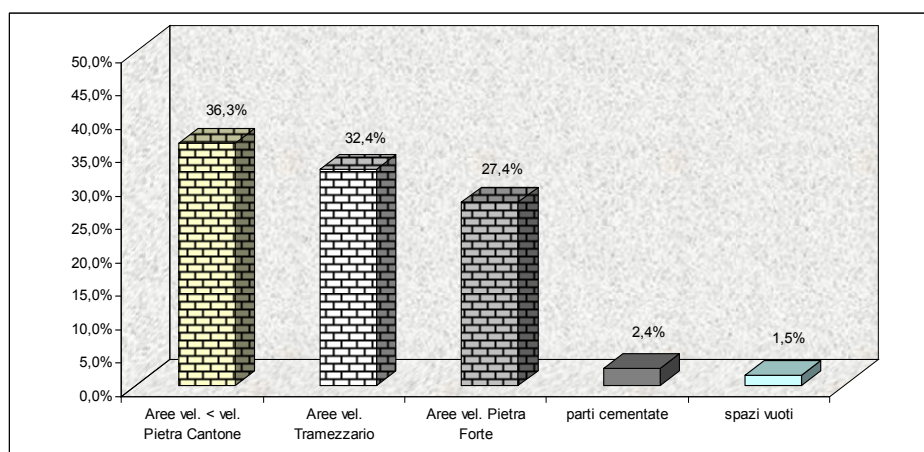


Figura 2.63: Istogramma dell'estensione in percentuale delle aree caratterizzate da diverse velocità ultrasoniche.

Nell'istogramma in figura 2.63, viene illustrata l'estensione in percentuale delle aree con diverse caratteristiche di velocità ultrasonica: l'elemento strutturale investigato è costituito per il 36,3% da aree caratterizzate da velocità ultrasonica inferiore a quella della *Pietra Cantone*, per il 32,4% da zone con velocità paragonabile a quella del *Tramezzario*, per il 27,4% da zone

con velocità ultrasonica paragonabile a quella della *Pietra Forte*. Le parti cementate costituiscono il 2,4% dell'area investigata e i vuoti l'1,5%.

CAPITOLO 3

SPERIMENTAZIONI EFFETTUATE SUL CALCARE “*GLOBIGERINA LIMESTONE*” DI MALTA

Premessa

Uno degli obiettivi di questa Tesi è la comparazione tra le caratteristiche di due calcari oligomiocenici, i *Calcari di Cagliari* e il *Globigerina Limestone* di Malta.

L'arcipelago maltese è formato essenzialmente da calcari, il più importante dei quali, per il suo larghissimo impiego nell'edilizia, è il cosiddetto *Globigerina Limestone* nelle sue due tipologie: *Franka* e *Soll* (termini derivanti dal linguaggio dei cavaatori). Ancora oggi la maggior parte delle costruzioni vengono edificate utilizzando questa tipologia di calcare e tutte le pregevoli e numerose costruzioni storiche e monumentali maltesi sono costituite da questa stessa litologia (molti degli importanti monumenti maltesi fanno parte del patrimonio dell'umanità dell'UNESCO).

I motivi del largo utilizzo del *Globigerina Limestone* sono da ricercarsi nella sua facile reperibilità, nella grande disponibilità e nella sua facilità di lavorazione. Nonostante il *Globigerina Limestone* dia una caratteristica impronta al paesaggio urbano di tutte le città maltesi, questa litologia, in alcune sue tipologie -soprattutto in quella indicata come *Soll*-presenta alcuni problemi di durezza e resistenza agli agenti atmosferici, alla presenza di umidità, dell'inquinamento atmosferico cittadino e soprattutto dei sali solubili.

Da millenni, a Malta, la selezione del *Globigerina Limestone* viene effettuata dai cavaatori e dai lavoratori edili. Questi, con la loro esperienza e servendosi di criteri essenzialmente visivi e tattili, riescono ad identificare il materiale adatto per le costruzioni da realizzare distinguendone i tipi, cosa impossibile da fare per una persona non esperta in questo campo. «[...] *In the fresh state, the two types cannot be distinguished visually [...]*» (Cassar, 2010).

In questo capitolo si illustra come sia possibile distinguere i diversi tipi di *Globigerina Limestone*, almeno quelli che si possono porre agli "estremi" della gamma dei tipi (tenendo conto delle caratteristiche fisiche), e come si possano valutare le loro caratteristiche di assorbimento di acqua (fattore fondamentale quando si analizza la durezza del materiale), usando metodi analitici non distruttivi (metodi ultrasonici e termografici) in un modo nuovo per questo specifico materiale. Quindi si vuole offrire un'opzione in più ai metodi classici di riconoscimento visivo e macroscopico dei materiali, e ai test di laboratorio di tipo classico che

sono in corso in altri studi (e.g. Zammit *et alii*, 2007), utilizzando in questo caso, metodi oggettivi e scientifici ma anche veloci da eseguire e ripetibili sullo stesso campione.

É utile saper distinguere il tipo e la qualità del calcare utilizzato in una costruzione esistente per poter eseguire una diagnosi dello stato di conservazione dell'opera e poter effettuare più consapevolmente un eventuale intervento di restauro. In questa ottica, nel presente lavoro, tenendo conto dei risultati ottenuti in laboratorio, si presentano anche i risultati di una campagna di indagini in situ effettuate in una delle molte strutture monumentali di Malta, l'antica sede universitaria ed ex Collegio dei Gesuiti a Valletta. A questa campagna è stata associata successivamente un'analisi comparativa, effettuata con le stesse tecniche, su una struttura moderna e in buone condizioni di conservazione, la sede attuale della "*Faculty for the Built Environment*", struttura che fa parte del Campus Universitario di Msida. Le analisi in sito sono state eseguite utilizzando le stesse tecniche utilizzate per le misure di laboratorio - misure ultrasoniche e termografiche-, tecniche non distruttive che oltre a permettere un'analisi speditiva e affidabile, permettono di operare senza arrecare danni alle strutture.

3.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Le isole maltesi consistono in 316 km² di terra emersa, che giace a 93 km a Sud dalla Penisola di Ragusa in Sicilia, nella parte meridionale della piattaforma delle Pelagie (Piattaforma Pelagiana) (Pedley, 1978). Gli affioramenti delle isole maltesi, che sono oligo-miocenici, poggiano sulla cosiddetta “*Malta Plateau*” che si trova nella parte nord-orientale della Piattaforma Pelagiana. Il *Malta Plateau* consiste in una spessa crosta continentale. Pozzi perforati nella zona orientale di Malta indicano che tale *plateau* è composto da più di 4500 metri di calcari e dolomiti intercalati da rocce vulcaniche in vari livelli stratigrafici, tutti risalenti al periodo che va dal Triassico superiore al Quaternario (Micallef *et alii*, 2011).

La sequenza geologica di superficie (Figura 3.1) delle isole maltesi ha un diretto controllo sulla topografia superficiale. Questa sequenza geologica, costituita da quattro unità distinte, è localmente disturbata da faglie sub-verticali. Gli strati sono in giacitura sub-orizzontale in tutte le isole e sono caratterizzati ognuno da differenti caratteristiche di resistenza all’erosione (Pedley *et alii*, 2002).

Le quattro formazioni principali che costituiscono gli affioramenti nelle isole maltesi sono: *Upper Coralline Limestone Formation*, *Blue Clay Formation*, *Globigerina Limestone Formation* e *Lower Coralline Limestone Formation*, più una secondaria, la *Greensand Formation*, che giace alla base dell’*Upper Coralline Limestone Formation*.

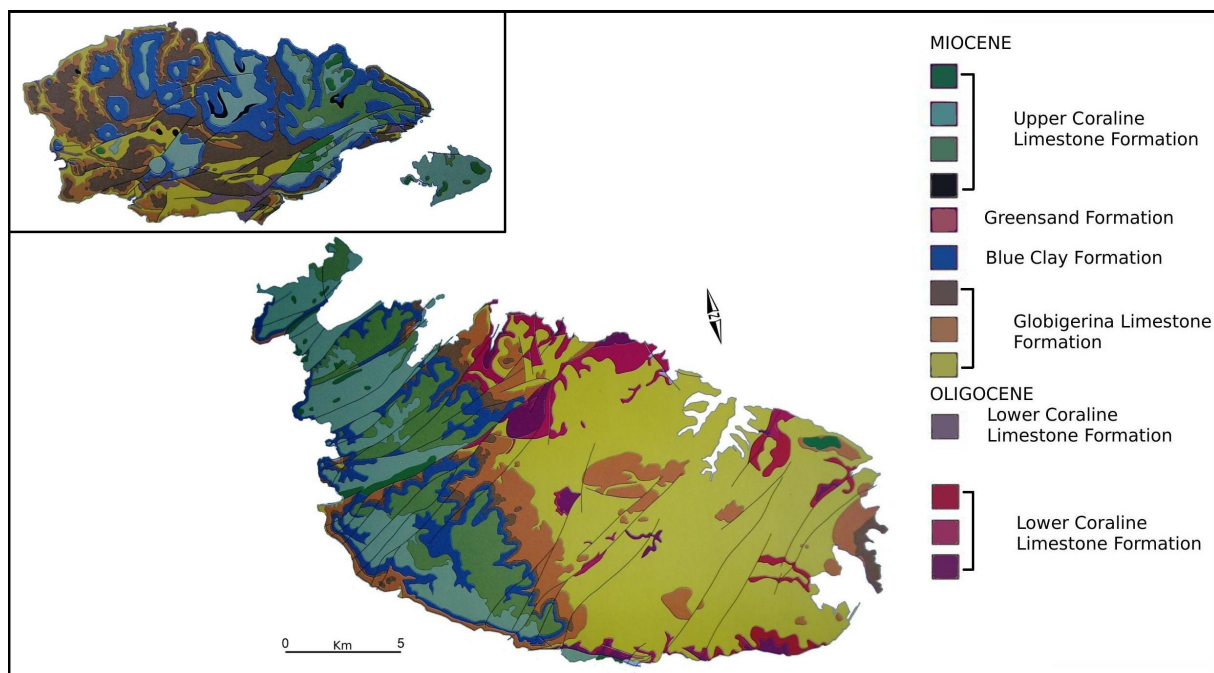


Figura 3.1: Inquadramento geologico dell’arcipelago maltese (da Pedley *et alii*, 2002, con modifiche).

Dalla base al tetto della successione, le quattro unità sono le seguenti (Figura 3.2), (Pedley *et alii*, 2002):

- I) Unità di calcare compatto grigio chiaro che forma scogliere ripide che possono essere alte da dieci a più di cento metri, particolarmente nella zona sud-occidentale delle isole. Questa unità è chiamata “*Lower Coralline Limestone Formation*” (*Chattian-Aquitainian*, 35-25 M.A.), perché contiene dei letti con fossili di coralli e resti calcarei di alghe. Questa unità può avere spessore di oltre 140 metri e la sua base non può essere osservata sopra il livello del mare.
- II) Unità di calcare più tenero del precedente, giallastro e a grana fine, che forma pendii irregolari composti da terrazzi e da spessori leggermente più duri. Questa unità è chiamata “*Globigerina Limestone Formation*” (*Aquitainian-Burdigalian*, 25-15 M.A.). *Globigerina* è il nome comune di un tipo di conchiglia di micro foraminifero che si ritrova in abbondanza in questo tipo di calcare. Questa unità può variare da 20 a oltre 200 metri di spessore.
- III) Unità molto tenera che si può ritrovare raramente esposta in superficie, che forma pendii franosi che sono spesso ricoperti da suolo o detriti sparsi. Quando questa unità è esposta in un pendio oppure è soggetta all’erosione marina, si possono osservare delle bande bluastre di argille o marne. Questa unità è chiamata “*Blue Clay Formation*” (Formazione delle Argille Blu) (*Langhian-Serravallian-Tortonian*, 15-8 M.A.), proprio per la sua composizione argillosa. Lo spessore di questa unità varia da 20 a circa 70 metri.
- IV) L’unità che si trova più in alto è composta da un calcare compatto, grigio chiaro che appare simile all’unità che si ritrova alla base della successione (I). Anche questa unità dà forma a scogliere ripide di varie altezze. Questi calcari contengono fossili di coralli e alghe e, per questo motivo, viene chiamata “*Upper Coralline Limestone Formation*” (*Tortonian-Messinian*, 8-5 M.A.). Questa unità può avere spessori di oltre 150 metri, tuttavia, generalmente costituisce coperture poco spesse di collina.

Una quinta unità secondaria e non sufficientemente spessa per influenzare significativamente le forme della topografia superficiale, viene indicata come “*Greensand Formation*” (*Langhian-Serravallian-Tortonian*, 15-8 M.A.). Questa unità, generalmente non supera il metro di spessore ma occasionalmente può superare i 10 metri di spessore nell’Isola di Gozo. Quando esposta al taglio fresco di cava, ha un colore caratteristico verde, dato dalla

dispersione di grani della grandezza della sabbia di colore verde scuro, costituiti da un minerale potassico-ferro-alluminio silicatico che è la Glauconite (Pedley *et alii*, 2002).

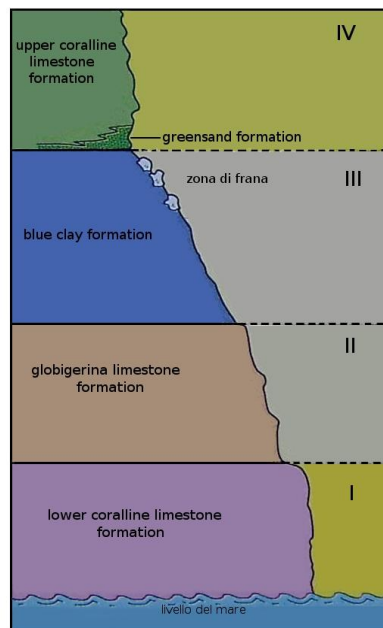


Figura 3.2: Sequenza geologica degli affioramenti delle Isole maltesi (da Pedley *et alii*, 2002, con modifiche).

Globigerina Limestone Formation:

La *Globigerina Limestone Formation*, sulla quale si è deciso di concentrare le ricerche perché la principale formazione economicamente sfruttata per l'edilizia, affiora nella parte centrale e meridionale dell'isola principale di Malta e nella parte occidentale della più piccola isola di Gozo. Essa si ritrova in spessi strati negli affioramenti. Sono frequenti le sezioni dove ci sono delle bioturbazioni concentrate. La formazione del *Globigerina Limestone* viene suddivisa in tre membri, separati da uno strato ricco in fosforiti (di solito spesso circa 50 cm): *Upper*, *Middle* e *Lower Globigerina Limestone*. Il membro che viene interessato da questo studio è il *Lower Globigerina Limestone*, che è quello più largamente impiegato per l'edilizia. Questo è composto da un calcare massivo, di colore da bianco chiaro a giallo, biomicritico, ricco in globigerinae e da un calcare parzialmente marnoso (Pedley *et alii*, 2002). Localmente sono abbondanti i macrofossili che consistono in molluschi, echinodermi, briozoi e varie specie di pteropodi. Nel membro del *Lower Globigerina Limestone*, si riscontrano due tipi principali: *Franka* e *Soll* (termini che derivano dal gergo dei lavoratori delle cave locali e degli operai edili), gli strati delle tipologie *Franka* e *Soll* sono di spessori variabili. Queste due tipologie hanno una importanza particolare perché sono utilizzate largamente nell'edilizia a Malta.

Il primo riferimento alla tipologia *Soll* lo fece C.H. Colson che chiamò questo tipo di Globigerina '*saul*' (Murray, 1890). Quest'ultimo descrisse le cave di 'Ta Daul' (oggi conosciute come 'Tad-Dawl', a Mqabba) come costituite da differenti strati. L'autore menziona “uno strato di pietra più scura che non resiste all'esposizione, chiamata *Saul*“. Nel 1958, una relazione non pubblicata sulle pietre maltesi, redatta dal *Building Research Establishment*, indica il 'soil' come pietra “che a volte si ritrova in altri strati di buona qualità”. Sebbene gli autori, in questo lavoro, affermino che questo litotipo viene individuato come “più scuro della tipologia *Franka*” e quindi identificabile, si afferma anche che questo meno durevole litotipo si origina da occasionali e povere congiunzioni tra strati nelle cave e che sono difficili da individuare (Cassar, 2002). La tipologia *Franka*, indicata dagli addetti ai lavori anche come *Freestone*, resiste bene all'esposizione degli agenti atmosferici, formando una superficie resistente, mentre la tipologia *Soll* si deteriora più facilmente (Cassar *et alii*, 2003).

3.1.1 CENNI SUI PROCESSI DI DEGRADO DEL *GLOBIGERINA LIMESTONE*

Come già accennato, il *Globigerina Limestone*, utilizzato nelle costruzioni a Malta si rinviene nelle due principali tipologie *Franka* e *Soll*. Queste due tipologie differiscono soprattutto nelle proprietà fisiche. Oltre alle proprietà intrinseche di queste due tipologie, anche l'ambiente maltese, ricco di sali marini (in particolare cloruro di sodio e solfati) influenza l'alterazione dei materiali, inducendo un veloce e intenso deterioramento nella tipologia *Soll*, mentre la tipologia *Franka* presenta una maggiore resistenza (Cassar, 2002). La tipologia *Franka*, dopo la messa in opera, conserva le sue caratteristiche fisiche sviluppando spesso una superficie resistente che viene colonizzata da licheni che proteggono il materiale sottostante. I blocchi della tipologia *Soll* si deteriorano fino a polverizzarsi dopo qualche decennio, mostrando una tipica evoluzione del degrado di tipo alveolare (Figura 3.3 a).

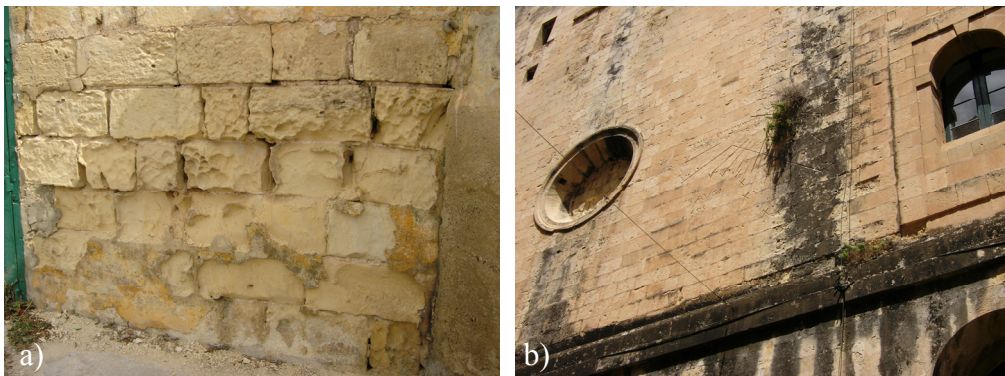


Figura 3.3: (a) grave fenomeno di disgregazione alveolare in una struttura muraria di Lija (Malta); (b) croste nere nel paramento esterno in muratura calcarea dell'antica sede universitaria di Valletta (Malta).

Vari studi effettuati sul *Globigerina Limestone* (e.g. Cassar, 2002; Cassar *et alii*, 2003, 2008), indicano che l'ambiente esterno agisce in modo aggressivo più sulla tipologia *Soll* che sulla tipologia *Franka* perché la prima tipologia possiede una grande percentuale di pori piccoli³ rispetto alla seconda, questi pori, spesso, sono occlusi da una frazione non carbonatica (fillosilicati e quarzo). La pressione di cristallizzazione dei sali, che agisce meccanicamente sui pori, ha un'azione particolarmente dannosa soprattutto sui pori piccoli (che caratterizzano soprattutto la tipologia *Soll*). Anche in altri studi (e.g. Rossi Manaresi & Tucci, 1991) è stato osservato che quando una roccia ha una grande porzione di pori piccoli (<1 μm) ed è contaminata da sali solubili, si può raggiungere un'alta pressione di cristallizzazione che

³ Il *Soll* è caratterizzato da pori con un raggio medio di 0.9872 μm . Il 2.81% dei pori del *Soll* ha raggio compreso tra 2 e 6 μm , il 48,95 % dei pori ha raggio compreso tra 0,1 e 0,6 μm . Il *Franka* è caratterizzato da pori con un raggio medio di 3.7617 μm , Il 53.51% dei pori del *Franka* ha raggio compreso tra 2 e 6 μm , il 13.22% dei pori ha raggio compreso tra 0,1 e 0,6 μm (Muscat, 2006), (Cassar *et alii*, 2008).

genera degrado. Il *Globigerina Limestone* può essere affetto anche dagli altri tipi di deterioramento (che possono colpire tutte le rocce calcaree), come croste nere (Figura 3.3 b) ed efflorescenze già descritte nel paragrafo 2.1.1.

È utile riportare quello che osservano altri autori (Cassar, 2002) a proposito della tipica evoluzione dell'alterazione che può affliggere il *Globigerina Limestone* in opera:

Nella prima fase di degrado si osserva la formazione di una crosta superficiale fine e compatta, successivamente, i cicli ricorrenti di dissoluzione e precipitazione dei sali solubili generano strati di croste. La graduale perdita delle croste espone una superficie già notevolmente deteriorata. Si verificano, nel materiale, ulteriori cristallizzazioni che producono nuove perdite di frammenti litici. Infine, sopraggiunge la fase finale di disgregazione alveolare (Cassar, 2002). Sono state osservate delle analogie tra l'evoluzione del degrado descritta in bibliografia e alcune manifestazioni del deterioramento rilevate in questo studio, i cui particolari sono illustrati in figura 3.4.

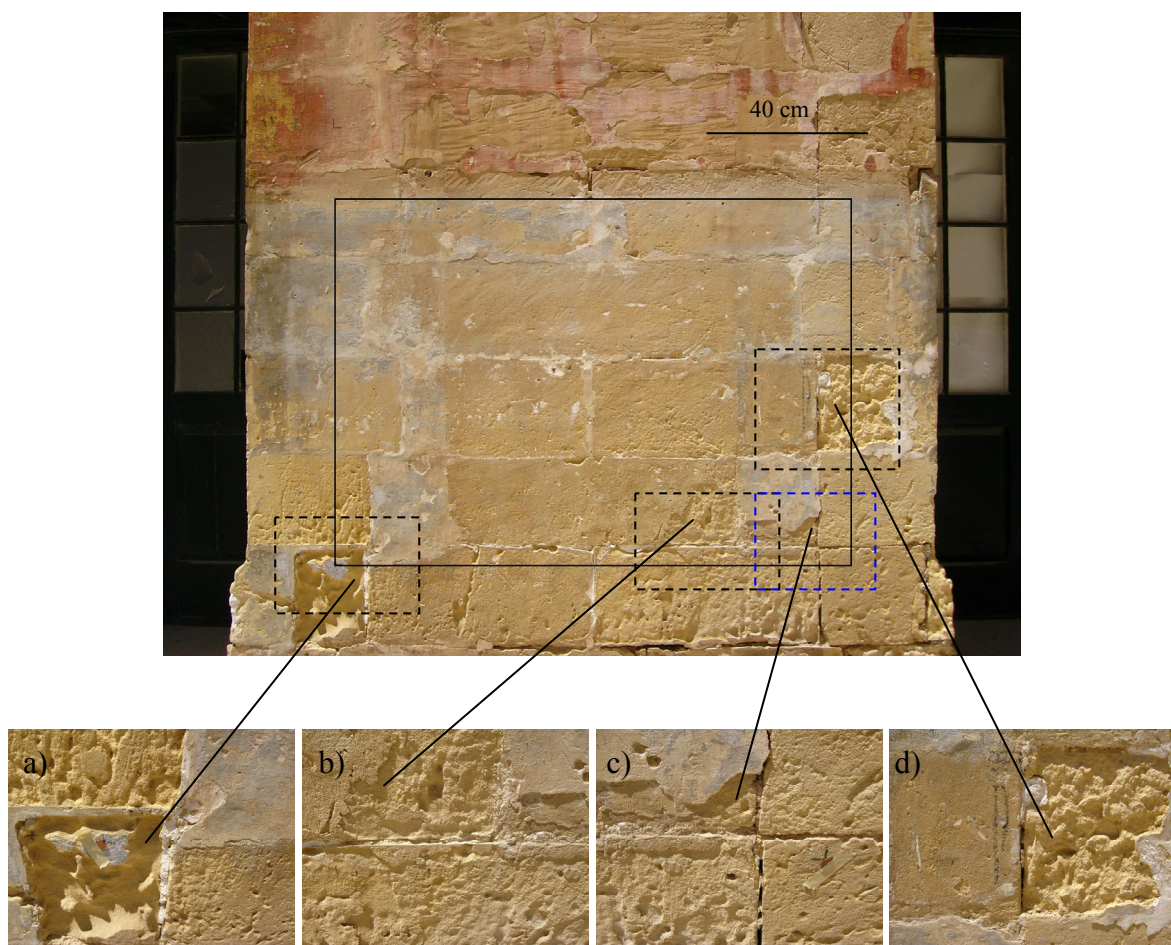


Figura 3.4: Particolari delle zone alterate nell'area indagata dell'antica sede universitaria di Valletta, si notino i vari livelli di disgregazione fino all'alveolizzazione osservabile nel riquadro "a".

Nel riquadro “b” in figura 3.4, si può notare la presenza di una crosta che si sta staccando, lasciando esposta una superficie deteriorata. Lo stesso fenomeno si può osservare anche nel riquadro “c”. Nel riquadro “d” si può notare un livello di deterioramento ancora più avanzato (pre-alveolare). Infine, nel riquadro “a”, risulta evidente un principio di disgregazione alveolare.

3.2 SPERIMENTAZIONE IN LABORATORIO

Introduzione

Le due tipologie di *Globigerina Limestone*, il *Franka* e il *Soll*, differiscono per caratteristiche fisiche che ne influenzano i meccanismi di deterioramento. Tali tipologie sono differenti soprattutto nella percentuale di pori di piccole dimensioni, più consistente nella tipologia *Soll* (Cassar, 2002).

Tuttavia, come già sottolineato, *Franka* e *Soll* non sono generalmente distinguibili macroscopicamente (se non da personale esperto nel riconoscimento basato su metodi empirici, di questa specifica litologia) nel taglio in cava fresco e neanche nei blocchi già tagliati, messi in opera e non deteriorati. Solo i cavaatori, i costruttori e i professionisti maltesi esperti nel settore (architetti, geologi e ingegneri) riescono a distinguere agevolmente le due tipologie. I cavaatori selezionano i blocchi per le costruzioni e per i restauri basandosi sull'esperienza e su criteri visivi e tattili (Cassar, 2004).

La tipologia *Franka* viene utilizzata, di solito, per la costruzione di tutte le parti delle strutture, per via della sua maggiore resistenza al degrado derivante dagli agenti atmosferici. La tipologia *Soll* invece, viene utilizzata raramente e solo per le fondazioni. Infatti, tale litotipo, pur presentando una minore durezza, possiede in genere una maggiore resistenza a compressione (allo stato secco) rispetto alla tipologia *Franka* (Cachia, 1985; Sammut, 1991; Cassar *et alii*, 2008; Cassar, 2010). Tuttavia, per errori nella distinzione del tipo di *Globigerina Limestone*, può accadere occasionalmente che dei blocchi di *Soll* vengano utilizzati nelle parti delle strutture esposte agli agenti atmosferici. In tal caso si verifica un'alterazione più accelerata nella zona dove sono eventualmente presenti i blocchi di *Soll*.

Il *Franka* e il *Soll* hanno, dunque, due modalità di alterazione diverse, il *Soll* si altera più facilmente e velocemente con l'azione degli agenti atmosferici. Questo fatto fondamentale rispecchia le differenze fisico-chimiche tra i due tipi. La tipologia *Franka* ha una percentuale del 67% di pori nell'intervallo di grandezza superiore a 1 mm, mentre la tipologia *Soll* ha solo il 42% dei suoi pori in questo intervallo di grandezza. Il volume dei pori inferiori a 1 mm è del 33% per il *Franka* e del 58% per il *Soll* (Rothert *et alii*, 2007). Anche Fitzner *et alii* (1996) sostengono che la tipologia *Soll* differisce dal *Franka* soprattutto per la minore porzione di pori grandi e maggiore porzione di pori piccoli e molto piccoli, conseguentemente, la superficie dei pori (nel *Soll*) è significativamente maggiore.

Le caratteristiche fisico-chimiche di tutte le litologie, e quindi anche delle rocce calcaree, influenzano sempre il loro processo di alterazione (e.g. Fitzner *et alii*, 2002). Pertanto, la

distinzione dei due tipi di *Globigerina Limestone* risulta di fondamentale importanza. Lo scopo delle sperimentazioni ultrasoniche, condotte in questo studio, consiste nella verifica dell'efficacia di tale tecnica come metodo analitico oggettivo di riconoscimento e distinzione dei due litotipi *Franka* e *Soll*, oltre che come tecnica di analisi del loro stato di conservazione. Sui campioni, in laboratorio, si è deciso di effettuare anche delle prove di risalita capillare con verifica termografica e delle prove di assorbimento in immersione in vasche di stagionatura. Le analisi termografiche sono state effettuate per stabilire se i diversi tipi di *Globigerina Limestone* abbiano diverse dinamiche di infiltrazione dell'acqua per capillarità e per verificare se anche la tecnica termografica possa essere utilizzata, in questo caso, come tecnica di verifica oggettiva e scientifica. Sono state effettuate, inoltre, sulle stesse tipologie di calcare, calcimetrie, diffrattogrammi, analisi in sezione sottile, misure di densità e di assorbimento d'acqua in immersione. Queste ultime analisi sono state effettuate per accertare che ci fossero delle reali differenze nella capacità di assorbimento nelle diverse tipologie. Caratteristica questa, che ha una grande influenza nelle modalità di deterioramento del materiale.

3.2.1 Descrizione macroscopica dei campioni

Lo studio è stato realizzato su campioni testati e identificati in precedenza come termini “estremi” delle due tipologie *Franka* e *Soll*, vale a dire come gruppo di campioni che possiedono, globalmente, caratteristiche fisiche, peculiari delle diverse tipologie, molto accentuate. Le caratteristiche dei campioni scelti hanno mostrato, anche in sperimentazioni pregresse, una netta differenza tra i due litotipi, anche se non facilmente riscontrabile visivamente. Il riconoscimento della tipologia *Soll* risulta semplice solo in alcuni vecchi tagli di cava, dove l’alterazione meteorica può mettere in evidenza la presenza di strati di questa tipologia (Figura 3.5 b).



Figura 3.5: (a) cava *Tar-Robba Government Soft Stone Quarry* – Luqa; (b) orizzonte di *Soll* in cava. L’orizzonte di *Soll* risulta visibile perché si trova in un vecchio fronte di cava dove l’alterazione meteorica ha agito in modo differenziale.

Nelle analisi effettuate, per la tipologia *Franka* sono stati presi in considerazione due sottotipi, denominati *Franka Bajda* (indicato anche con il termine *Franka White*) e *Franka Safra* (indicato anche con il termine *Franka Yellow*), questa è la terminologia locale che viene utilizzata per indicare due sottotipi di *Franka* distinguibili visivamente solo per la loro colorazione, più chiara per il primo tipo. Pertanto, la sperimentazione in argomento ha avuto anche lo scopo di definire una metodologia atta a discriminare in modo accurato e oggettivo i diversi tipi di *Globigerina Limestone*.

I campioni utilizzati nell’ambito di questo lavoro fanno parte di una serie già utilizzata per uno studio iniziato nel 2005. Inizialmente, la distinzione tra i tipi di pietra venne fatta solo tra *Franka* e *Soll*, attraverso l’analisi delle modalità di deterioramento dei summenzionati litotipi e osservando un vecchio fronte di cava. La distinzione venne fatta anche grazie all’esperienza del proprietario della cava e all’osservazione di altre caratteristiche macroscopiche osservabili ad occhio nudo (Zammit, 2012). Successivamente, questi campioni sono stati utilizzati per

varie ricerche che includevano analisi di alterazione atmosferica accelerata, test di compressione monoassiale, test per residui di acidi insolubili, porosità totale, porosimetria a mercurio, assorbimento di acqua per capillarità e test di permeabilità (Muscat, 2006). In tabella 3.1 si riportano i risultati dei test effettuati in precedenza (Muscat, 2006; Cassar *et alii*, 2008) sui campioni in studio.

Test	Soll	Franka Bajda	Franka Safra
Acid Insoluble residue	7.03% +/-0.18	2.07% +/-0.11	2.29% +/-0.17
Uniaxial Compression	30.16MPa +/-1.68	19.85MPa +/-2.03	21.30MPa +/-0.59
Capillarity Coefficient	$1.63 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2 \text{ s}^{0.5}$	2.08	1.96
Permeability Coefficient	$5.796 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$	1.683×10^{-5}	1.861×10^{-5}
Total Porosity	29.8%	30.4%	35.6%
Mercury Int. Porosimetry	Soll	Franka Bajda	Franka Safra
Average pore radius	0.9872 μm	3.7617 μm	3.78041 μm
2-6 μm pore radius range	2.81%	53.51%	51.57%
0.1 -0.6 μm pore radius range	48.95%	13.22%	12.83%

Tabella 3.1: Risultati dei test effettuati in precedenza sui campioni in studio (Muscat, 2006), (Cassar *et alii*, 2008).

I campioni analizzati sono complessivamente 82, di cui 54 della tipologia *Franka* (27 "*Safra*" e 27 "*Bajda*") e 28 della tipologia *Soll*. I campioni sono di varie dimensioni (Figura 3,6), in conformità con le dimensioni consigliate dalla norma "Normal 22/86" (57×26×23 cm; 29×26×11.5 cm; 28×26.5×11.5 cm; 26,5×17×14,5 cm; 26,5×16×13,5 cm; 26×26×23 cm; 26×14×6 cm). Di questi campioni, quelli *Franka Safra* provengono dalla cava di *Hal-Kirkop* (35°50'55"N, 14°28'44"E), estratti ad una profondità di 25 metri dal piano di campagna, corrispondente a 54 metri sopra il livello del mare. I campioni di *Franka Bajda* provengono dalla cava di *Mqabba-Qrendi* (35°50'30"N, 14°27'30"E), sono stati estratti ad una profondità di 23 metri dal piano di campagna e 79.1 metri sopra il livello del mare. Anche i campioni di *Soll* provengono dalla cava di *Mqabba-Qrendi* e sono stati estratti ad una profondità di 21.5 metri, corrispondente a 80.6 metri sopra il livello del mare.

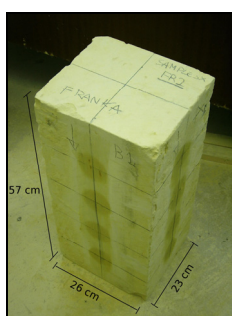


Figura 3.6: Uno dei campioni utilizzati per le misure ultrasoniche.

Come precedentemente accennato, la distinzione dei campioni inalterati delle due tipologie di *Globigerina Limestone* è molto difficile. I campioni di entrambi i tipi (*Franka* e *Soll*) possono essere descritti come “calcarei teneri e quasi puri” (*auct.*), di colore giallo crema pallido (Rothert *et alii*, 2007). Tutti i campioni di entrambe le tipologie presentano grana fine e tessitura generalmente omogenea nonché rare tracce di bioturbazione. Tutti i campioni di *Soll* e *Franka* si rigano con l’unghia, pertanto hanno durezze di poco superiori a 2 o 3 della scala di Mohs (Mohs, 1822).

Ricordando che i campioni erano stati identificati in precedenza come termini “estremi” delle tipologie, è opportuno indicare che, macroscopicamente, i campioni del sottotipo *Franka Bajda (White)*, differiscono da quelli del sottotipo *Franka Safra (Yellow)* solo per il colore.

I campioni della tipologia *Soll* presentano, solo in taluni casi e dopo prolungato stoccaggio in laboratorio, delle striature a bande leggermente più scure grigiastre o giallastre. Inoltre, a livello tattile (osservazione che viene fatta a seguito di prolungato contatto con i campioni in laboratorio), i campioni della tipologia *Soll* presentano superfici più lisce. Probabilmente, ciò è dovuto alla dimensione dei grani che costituiscono tale litotipo, evidentemente di dimensioni inferiori rispetto a quelli costituenti la tipologia *Franka*.

3.2.2 Misure ultrasoniche e termografiche

Misure ultrasoniche

Su una parte dei campioni descritti è stata realizzata una serie di misure ultrasoniche per determinare le caratteristiche elastiche dei due litotipi.

Per le misure ultrasoniche è stato utilizzato lo strumento P.U.N.D.I.T. (Figura 3.7) impiegando la modalità diretta, semidiretta e indiretta e utilizzando trasduttori con frequenza di 54 kHz. Come materiale di accoppiamento è stato usato un gel per ultrasuoni idrosolubile e atossico.

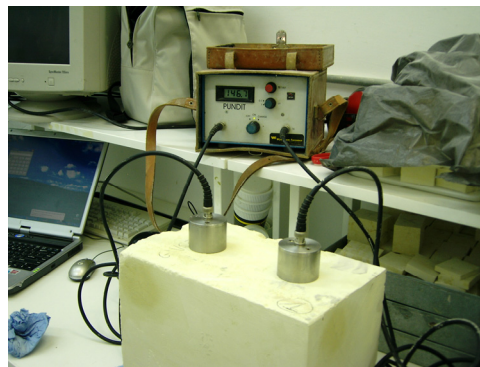


Figura 3.7: Strumento P.U.N.D.I.T. utilizzato per le sperimentazioni.

Per quanto riguarda le misure, dopo avere effettuato tutte le procedure indicate dalle norme (Normal 22/86, 1987, “*Misura della velocità di propagazione del suono*”) e ottenuto i tempi di transito del segnale ultrasonico longitudinale, sono state calcolate le velocità medie tramite la formula $V = l/t$ (dove V = velocità media; l = distanza tra emettitore e ricevitore; t = tempo di transito dell’onda longitudinale).

In tabella 3.2 sono riportati i risultati delle misure effettuate in modalità diretta, indiretta e semidiretta in tutti i campioni.

<i>Sigla campione</i>	<i>Velocità in In trasmissione diretta (m/s)</i>	<i>Velocità in In trasmissione indiretta (m/s)</i>	<i>Velocità in In trasmissione semidiretta (m/s)</i>	<i>Sigla campione</i>	<i>Velocità in In trasmissione diretta (m/s)</i>	<i>Velocità in In trasmissione indiretta (m/s)</i>	<i>Velocità in In trasmissione semidiretta (m/s)</i>
FR.1 (Franka Y)	2820	2930	3160	FR.40 (Franka Y)	2800	3310	3210
FR.2 (Franka Y)	2830	2970	3180	FR.41 (Franka Y)	2820	3320	3220
FR.A.Y. (Franka Y)	2870	3150	3270	FR.42 (Franka Y)	2810	3300	3230
FR.3 (Franka W)	2880	3030	3230	FR.43 (Franka Y)	2820	3310	3230
FR.4 (Franka W)	2810	3080	3160	FR.44 (Franka Y)	2840	3310	3210
FR.5 (Franka W)	2840	3080	3290	FR.45 (Franka W)	2820	3030	3130
FR.A.W. (Franka W)	2880	3520	3280	FR.46 (Franka W)	2950	3170	3330
FR.6 (Franka Y)	2890	3270	3260	FR.47 (Franka W)	2920	3080	3280
FR.7 (Franka Y)	2890	3260	3250	FR.48 (Franka Y)	2870	3000	3110
FR.8 (Franka Y)	2890	3280	3240	FR.49 (Franka Y)	2840	3000	3110
FR.9 (Franka Y)	2890	3260	3230	FR.50 (Franka Y)	2850	3000	3180
FR.10 (Franka W)	2900	3460	3320	FR.51 (Franka Y)	2860	3010	3170
FR.11 (Franka W)	2880	3500	3350	FR.52 (Franka Y)	2850	3030	3150
FR.12 (Franka W)	2860	3370	3270	SO.1 (Soll)	2490	2700	2720
FR.13 (Franka W)	2870	3250	3220	SO.2 (Soll)	2520	2720	2780
FR.14 (Franka W)	2870	3260	3250	SO.3 (Soll)	2520	2720	2760
FR.15 (Franka W)	2850	3320	3220	SO.4 (Soll)	2500	2710	2730
FR.16 (Franka W)	2850	3330	3170	SO.A.(Soll)	2600	2770	2820
FR.17 (Franka W)	2830	3330	3210	SO.5 (Soll)	2540	2740	2750
FR.18 (Franka W)	2860	3340	3180	SO.6 (Soll)	2520	2760	2700
FR.19 (Franka W)	2850	3330	3250	SO.7 (Soll)	2590	2770	2740
FR.20 (Franka W)	3000	3330	3220	SO.8 (Soll)	2610	2750	2720
FR.21 (Franka W)	2990	3320	3190	SO.9 (Soll)	2580	2770	2820
FR.22 (Franka W)	2850	3330	3180	SO.10 (Soll)	2590	2790	2820
FR.23 (Franka W)	2910	3350	3230	SO.11 (Soll)	2580	2780	2810
FR.24 (Franka W)	2860	3350	3220	SO.12 (Soll)	2580	2780	2800
FR.25 (Franka W)	2910	3340	3220	SO.13 (Soll)	2540	2690	2730
FR.26 (Franka W)	2880	3370	3180	SO.14 (Soll)	2520	2710	2730
FR.27 (Franka W)	2780	3360	3170	SO.15 (Soll)	2530	2720	2730
FR.28 (Franka W)	2830	3320	3190	SO.16 (Soll)	2540	2710	2730
FR.29 (Franka W)	2780	3360	3180	SO.17 (Soll)	2550	2740	2750
FR.30 (Franka Y)	2820	3400	3240	SO.18 (Soll)	2550	2730	2770
FR.31 (Franka Y)	2850	3370	3170	SO.19 (Soll)	2520	2740	2740
FR.32 (Franka Y)	2860	3330	3240	SO.20 (Soll)	2540	2730	2790
FR.33 (Franka Y)	2850	3340	3260	SO.21 (Soll)	2560	2770	2730
FR.34 (Franka Y)	2820	3360	3180	SO.22 (Soll)	2530	2790	2730
FR.35 (Franka Y)	2820	3320	3190	SO.23 (Soll)	2520	2760	2700
FR.36 (Franka Y)	2810	3330	3200	SO.24 (Soll)	2550	2780	2670
FR.37 (Franka Y)	2800	3330	3230	SO.25 (Soll)	2560	2850	2680
FR.38 (Franka Y)	2780	3330	3190	SO.26 (Soll)	2520	2820	2680
FR.39 (Franka Y)	2840	3320	3210	SO.27 (Soll)	2550	2780	2740

Tabella 3.2: Misure ultrasoniche di laboratorio: i campioni indicati con (Franka Y) appartengono al sottotipo Franka Safra, i campioni indicati con (Franka W) appartengono al sottotipo Franka Bajda.

Per fornire un quadro riassuntivo delle misure effettuate mediante la tecnica ultrasonica, sono stati predisposti gli istogrammi dei valori di velocità ultrasonica ottenuti in modalità diretta, indiretta e semidiretta, come indicato nelle figure dalla 3.8 alla 3.10.

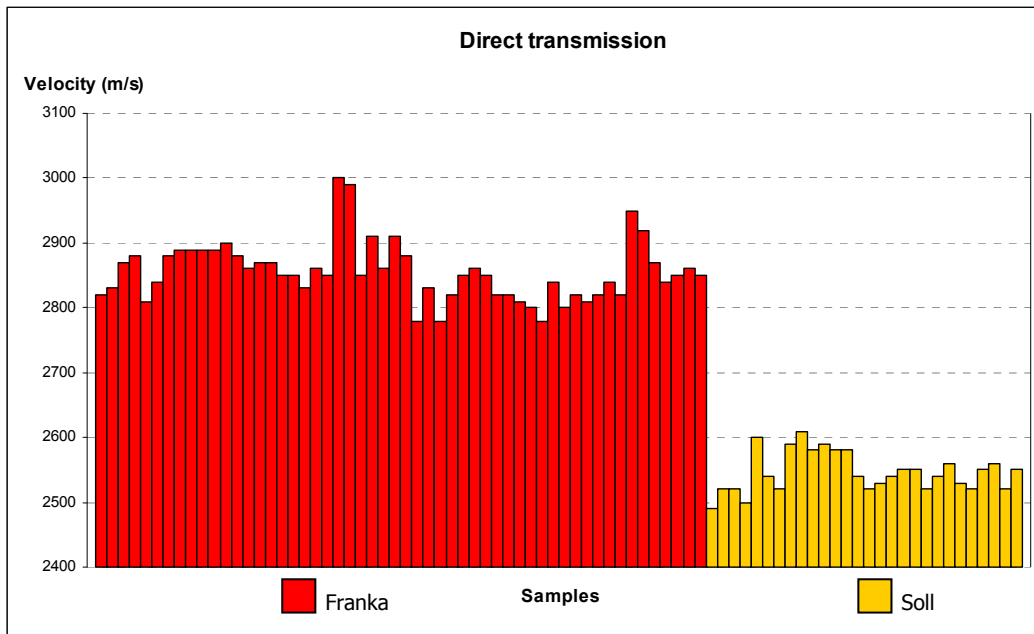


Figura 3.8: Istogramma delle velocità ultrasoniche ottenute mediante acquisizione in modalità diretta su tutti i campioni.

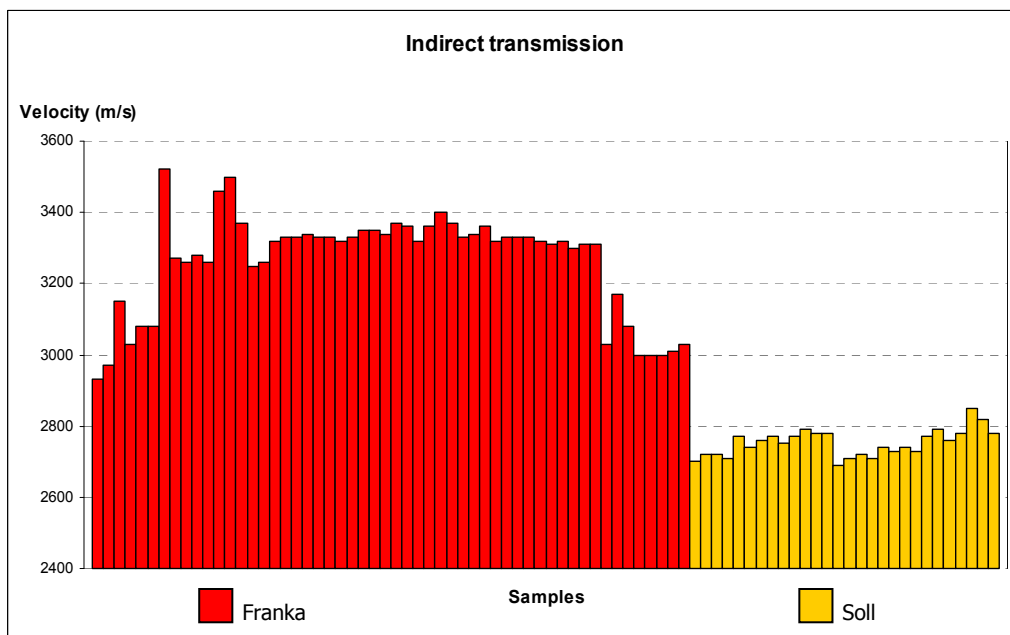


Figura 3.9: Istogramma delle velocità ultrasoniche ottenute mediante acquisizione in modalità indiretta su tutti i campioni.

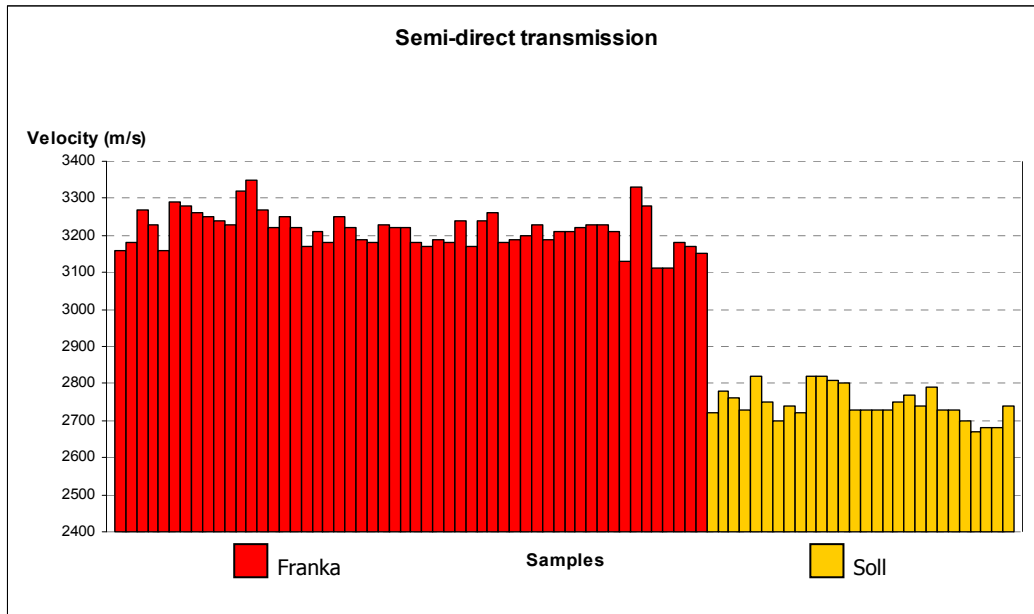


Figura 3.10: Istogramma delle velocità ultrasoniche ottenute mediante acquisizione in modalità semidiretta su tutti i campioni.

Focalizzando l'attenzione sulle misure in modalità diretta, si riscontra che la velocità media misurata sui campioni di *Franka Safra* è di 2840 m/s e 2870 m/s per i campioni di *Franka Bajda*, mentre la velocità ultrasonica media registrata nel *Soll* è di 2546 m/s. Tutti i campioni di *Franka*, presentano velocità ultrasoniche maggiori di circa 300 m/s rispetto al *Soll*. Tale differenza indica una differenza nelle caratteristiche elastiche dei due litotipi, e quindi la possibilità di una loro discriminazione anche mediante metodi acustici.

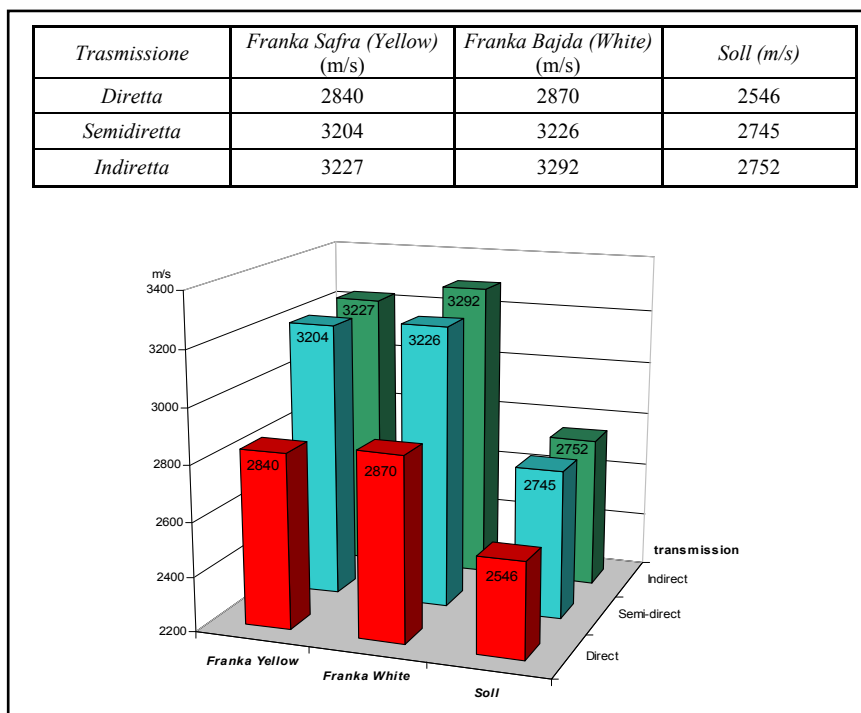


Figura 3.11: Valori medi delle velocità ultrasoniche relative alle misure eseguite con le diverse modalità operative.

Come è possibile notare nella figura 3.11, non ci sono differenze significative tra le velocità registrate per la varietà *Franka Bajda* e la varietà *Franka Safra*. Pertanto, queste due varietà del litotipo *Franka* non sono distinguibili strumentalmente e dal punto di vista delle loro proprietà elastiche si possono considerare come un'unica tipologia.

Misure ultrasoniche effettuate su campioni saturi

Queste misure sono state effettuate per determinare i valori delle velocità ultrasoniche nei campioni saturi (V_{pf}). Tali valori di velocità risultano estremamente utili per calcolare la porosità per via dinamica, come descritto in diversi lavori effettuati nel settore della ricerca petrolifera (e.g. *Wyllie et alii* 1956, 1962; *Kowallis et alii*, 1984).

Pertanto, alcuni campioni di *Globigerina Limestone* (*Soll*, *Franka Safra* e *Franka Bajda*) sono stati immersi in acqua al fine di ottenere la massima saturazione possibile per questa litologia. Successivamente, i campioni saturi sono stati sottoposti a misure in trasmissione diretta, con impiego di trasduttori da 54 kHz.

Le velocità ottenute sui campioni saturi, sono state utilizzate per calcolare la porosità mediante la formula di *Wyllie* (1956, 1962) precedentemente utilizzata anche per i *Calcari di Cagliari*:

$$Cagliari: \phi = \frac{V_w(V_m - V_{pf})}{V_{pf}(V_m - V_w)}$$

I risultati del calcolo delle porosità dei campioni mediante la formula di *Wyllie* sono presentati in tabella 3.3, insieme ai valori medi delle velocità ultrasoniche (V_{pf}) relative ai campioni saturi.

<i>Litotipo</i>	<i>Soll</i>	<i>Franka Safra</i>	<i>Franka Bajda</i>
V_{pf} media (m/s)	2300	2600	2630
Porosità ϕ (calcolata per via dinamica), espressa in %	47%	44%	44%

Tabella 3.3: Porosità calcolata per via dinamica e V_{pf} media rilevata nei campioni saturi.

Come è possibile notare nella tabella 3.3, le velocità ultrasoniche longitudinali, rilevate sui campioni saturi sono meno elevate rispetto a quelle medie rilevate in modalità diretta sui campioni asciutti (Figura 3.11). Questo è dovuto probabilmente al fatto che certi campioni di *Globigerina Limestone* possono contenere una certa quantità di argilla e, allo stato saturo, questa litologia tende a perdere coesione con una conseguente perdita di rigidità della struttura. Questo fenomeno può portare ad un decremento delle velocità dell'impulso

ultrasonico longitudinale. Inoltre, la presenza di argille e una porosità di tipo chiuso può impedire la completa saturazione dei campioni che invece causerebbe un incremento delle velocità ultrasoniche. Infatti l'impulso ultrasonico longitudinale si propaga con velocità maggiore nell'acqua di imbibizione dei pori che nei pori contenenti aria.

Misure termografiche

Per quanto riguarda le prove di laboratorio effettuate mediante tecnica termografica, è stata utilizzata la termocamera Agema THV 1000, che tuttora è prodotta dall'azienda Flir Systems (Figura 3.12 a) e che è stata messa a disposizione dal “*Department of Metallurgy & Materials Engineering*” dell'Università di Malta. In tabella 3.4 sono riportate le principali caratteristiche tecniche dello strumento.

Field of view (H×V)	Wide: 20°×13°; Narrow: 5°×3.3°
Detector type	Multi element MCT SPRITE, cooled Integral Stirling
Wavelength	LW, 8-12 μ m
Spatial resolution - IfoV (H×V) -	Wide: 0.6×0.6 mRad; Narrow: 0.15×0.15 mRad
Minimum resolvable temperature (MRT)	<0.1° C
Focusing	Lenses Dual FoV
Sensor L×W×H	310×164×221 mm
Scanned image	NTSC/VGA; PAL
Storage Temperature	-40° to +70° C

Tabella 3.4: Caratteristiche tecniche della termocamera Agema THV 1000.

Le misure sono state effettuate su campioni della tipologia *Franka* (*Safra* e *Bajda*) e della tipologia *Soll*. Questi campioni facevano parte dello stesso gruppo di campioni sottoposti alle misure ultrasoniche.

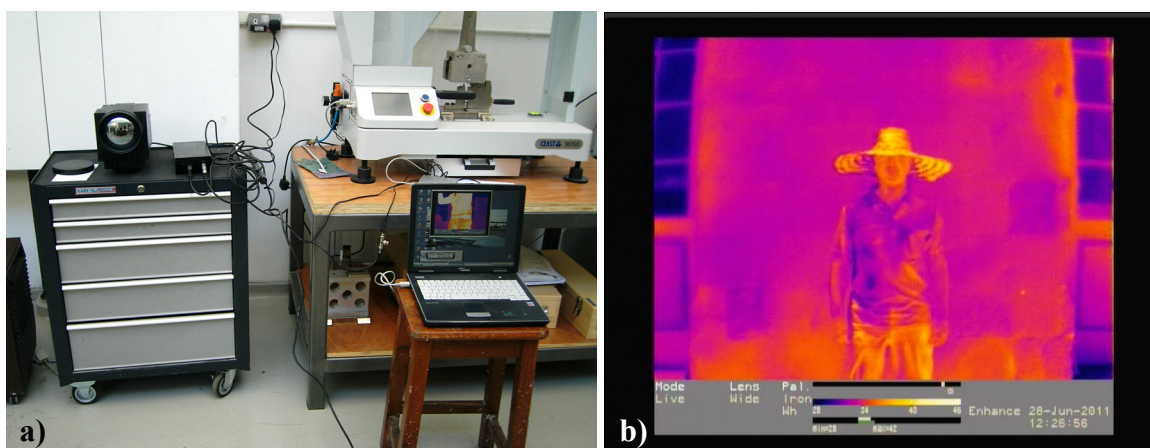


Figura 3.12: (a) termocamera utilizzata per le analisi termografiche, interfacciata con *laptop*; (b) *shot* termografico.

Per questa sperimentazione, i campioni sono stati posti in una lama d'acqua a livello costante

di 1 cm in una vasca di stagionatura e temperatura costante compresa tra 24° C e 25° C, anche l'ambiente esterno è stato mantenuto ad una temperatura costante di 25° C.



Figura 3.13: Vasca di stagionatura dove sono stati posti i campioni da sottoporre a termografia, nel particolare il regolatore di temperatura.

Per effettuare le misure si è operato con la tecnica “passiva”. È stata rilevata unicamente la temperatura dei campioni, in parte umidi per via della risalita capillare. Gli *shot* termografici sono stati effettuati alle cadenze temporali di 1, 2, 3 e 24 ore. Alle diverse misure i campioni sono stati posti in una tavola non assorbente, a temperatura costante, per la realizzazione dei termogrammi. Dopo le misure i campioni venivano riposizionati immediatamente in vasca.

Nelle rappresentazioni dei termogrammi riportati in figura 3.14, i campioni *Franka Safra* vengono indicati come “*Franka Y*” e i campioni di *Franka Bajda* come “*Franka W*”. Come si può osservare nei termogrammi riportati in tale figura, mentre i campioni di *Franka Safra* e *Franka Bajda* hanno proprietà di assorbimento per capillarità molto simili, il *Soll* è caratterizzato da una risalita capillare che differisce dai precedenti litotipi.

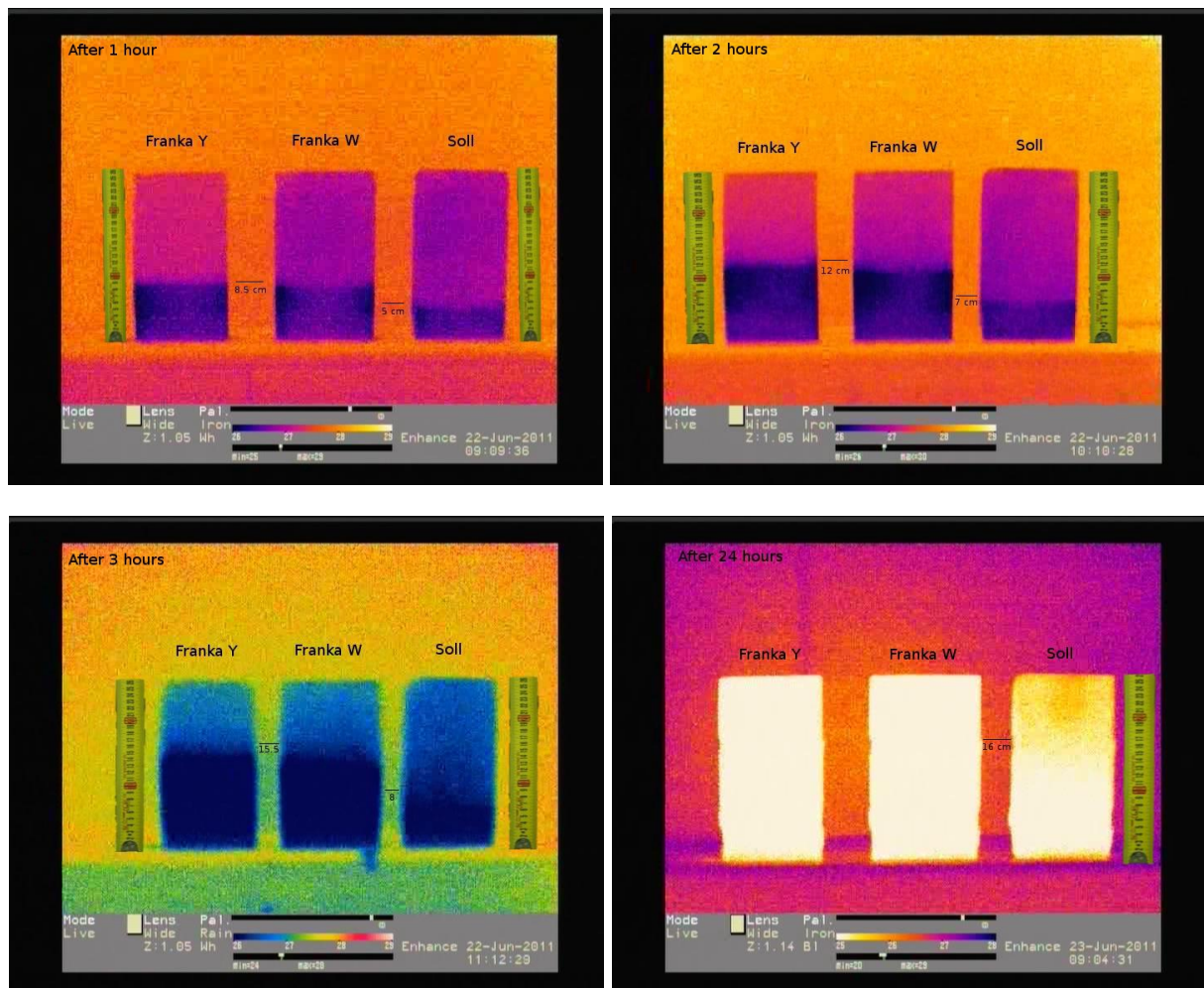


Figura 3.14: Termogrammi dei campioni *Franka Safra* (Y), *Bajda* (W) e *Soll* alle cadenze temporali di 1, 2, 3 e 24 ore.

Già dal termogramma scattato alla prima ora si nota come il *Soll* mostri una certa resistenza alla risalita capillare che invece si dimostra abbastanza accentuata nei campioni di *Franka*. Lo stesso *trend* viene confermato nei termogrammi effettuati dopo 2 e 3 ore. Dopo 24 ore, mentre i campioni di *Franka* risultano completamente e uniformemente saturi per tutta la loro altezza, il campione di *Soll* risulta saturo solo fino ad una altezza di circa 16 cm e per il resto dell'altezza solo parzialmente umido.

3.2.3 Confronto tra dati ultrasonici e contenuto in carbonati

Le calcimetrie sono state effettuate su campioni di *Globigerina Limestone* ricavati dalla macinazione di frammenti ottenuti dai campioni prismatici già sottoposti a misure di velocità ultrasonica. Queste misure sono state eseguite mediante lo stesso calcimetro di Dietrich-Frühling utilizzato per le misure effettuate sui calcari provenienti dal distretto di Cagliari, ed è stata utilizzata la stessa metodologia descritta nel relativo paragrafo.

I campioni sottoposti a calcimetria sono indicati con le sigle GFry e FR.A.Y. (tipologia *Franka Safra*, provenienti dalla cava di Hal-Kirkop), GFrw e FR.A.W. (tipologia *Franka Bajda*, provenienti dalla cava di Mqabba-Qrendi), GSoll e SO.A. (tipologia *Soll*, provenienti dalla cava di Mqabba-Qrendi).

Come si può notare nella tabella 3.5, i campioni di *Franka Safra* hanno un contenuto in carbonati che supera il 99%. Anche i campioni di *Franka Bajda* hanno un elevato contenuto in carbonati (99,1% per il campione FR.A.W. e 99,9% per il campione GFrw). I campioni di *Soll* hanno invece un contenuto minore in carbonati, dell'86,5% per il campione SO.A. e dell'87,3% per il campione GSoll.

Sigla campione	Provenienza	Tipologia	Peso (g)	Lettura Calcimetro (mL)	Carbonati (g/Kg)	Carbonati (%)
GFry	Cava Hal-Kirkop	Franka Safra	0,5	126	990,73	99,1
FR.A.Y.	Cava Hal-Kirkop	Franka Safra	0,5	126	990,73	99,1
GFrw	Cava Mqabba-Qrendi	Franka Bajda	0,5	127	998,60	99,9
FR.A.W.	Cava Mqabba-Qrendi	Franka Bajda	0,5	126	990,73	99,1
GSoll	Cava Mqabba-Qrendi	Soll	0,5	111	872,79	87,3
SO.A.	Cava Mqabba-Qrendi	Soll	0,5	110	864,93	86,5

Tabella 3.5: Contenuto in carbonati dei campioni di *Globigerina Limestone*.

I valori delle velocità ultrasoniche calcolate in laboratorio per i campioni in studio sono stati confrontati con il loro contenuto in carbonati. Per questa analisi sono state prese in considerazione le medie delle misure ultrasoniche effettuate in modalità diretta utilizzando trasduttori da 54 kHz. Le misure ultrasoniche sui campioni FR.A.Y., FR.A.W. e SO.A. sono state eseguite nei laboratori dell'Università di Malta, le misure ultrasoniche sui campioni GFry, GFrw e GSoll, sono state effettuate successivamente nel laboratorio di Geofisica della Terra Solida e Diagnostica del DICAAR dell'Università di Cagliari. In tabella 3.6 sono riportate le velocità ultrasoniche longitudinali calcolate per i suddetti campioni.

<i>Sigla campione</i>	<i>Provenienza</i>	<i>Tipologia</i>	<i>Velocità ultrasonica (m/s)</i>
GFry	<i>Cava Hal-Kirkop</i>	<i>Franka Safra</i>	7140
FR.A.Y.	<i>Cava Hal-Kirkop</i>	<i>Franka Safra</i>	6250
GFrw	<i>Cava Mqabba-Qrendi</i>	<i>Franka Bajda</i>	4490
FR.A.W.	<i>Cava Mqabba-Qrendi</i>	<i>Franka Bajda</i>	4440
GSoll	<i>Cava Mqabba-Qrendi</i>	<i>Soll</i>	3020
SO.A.	<i>Cava Mqabba-Qrendi</i>	<i>Soll</i>	3500

Tabella 3.6: Velocità ultrasoniche calcolate per i campioni di *Globigerina Limestone* sui quali sono state effettuate le calcimetrie.

In figura 3.15 si riporta il confronto tra il *trend* delle velocità ultrasoniche calcolate in laboratorio e il contenuto in carbonati dei campioni.

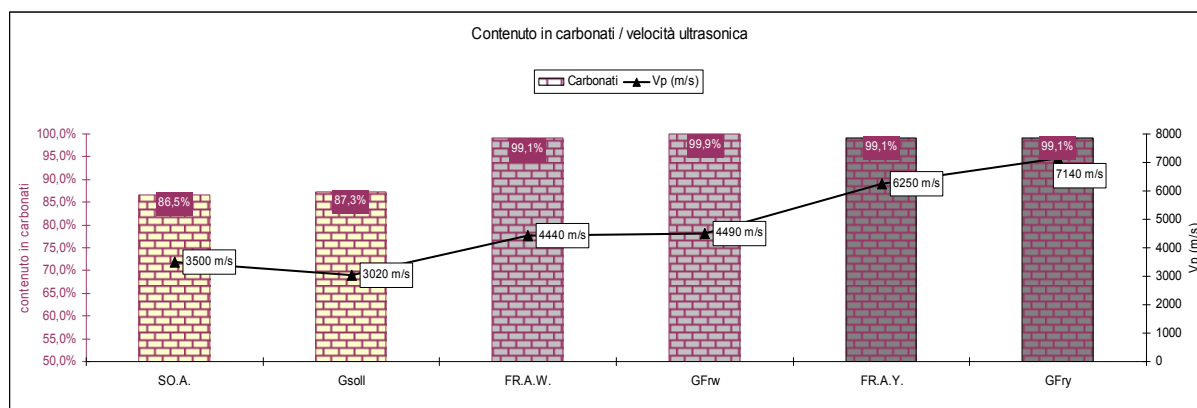


Figura 3.15: Trend delle velocità ultrasoniche al variare del contenuto in carbonati nei campioni.

Dall'analisi dell'istogramma riportato in figura 3.15, si può notare che il *trend* delle velocità ultrasoniche longitudinali presenta un generale incremento in funzione del contenuto in carbonati.

3.2.4 Analisi diffrattometriche

Le analisi diffrattometriche (XRD) sono state eseguite sulle polveri ottenute dalla macinazione di frammenti di roccia dei tre tipi di *Globigerina Limestone* ricavate dai campioni GFry, GFrw e GSoll.

I diffrattogrammi di questi campioni sono riportati nelle figure 3.16, 3.17 e 3.18.

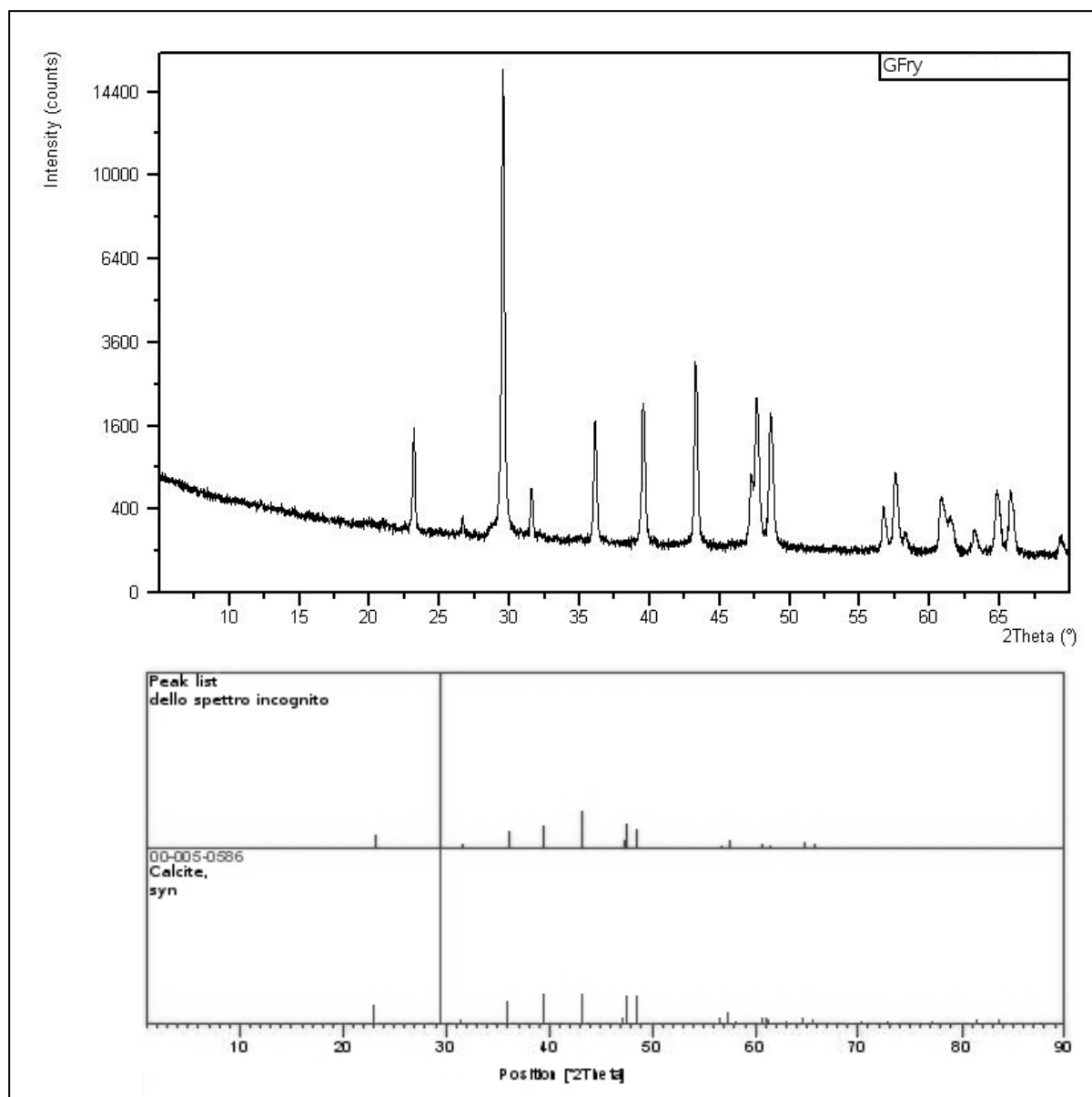


Figura 3.16: Diffrattogramma del campione GFry.

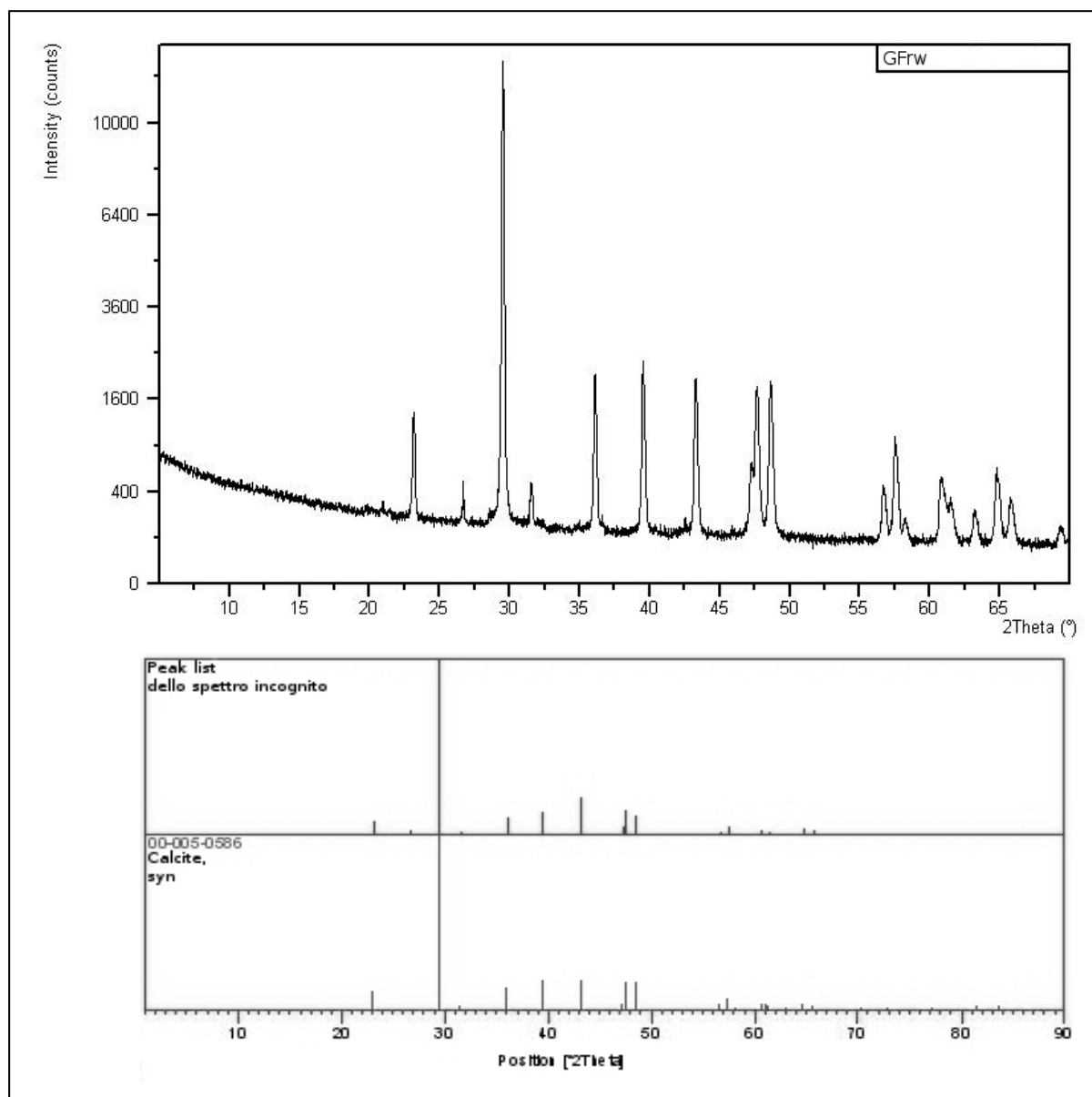


Figura 3.17: Diffratogramma del campione GFrw.

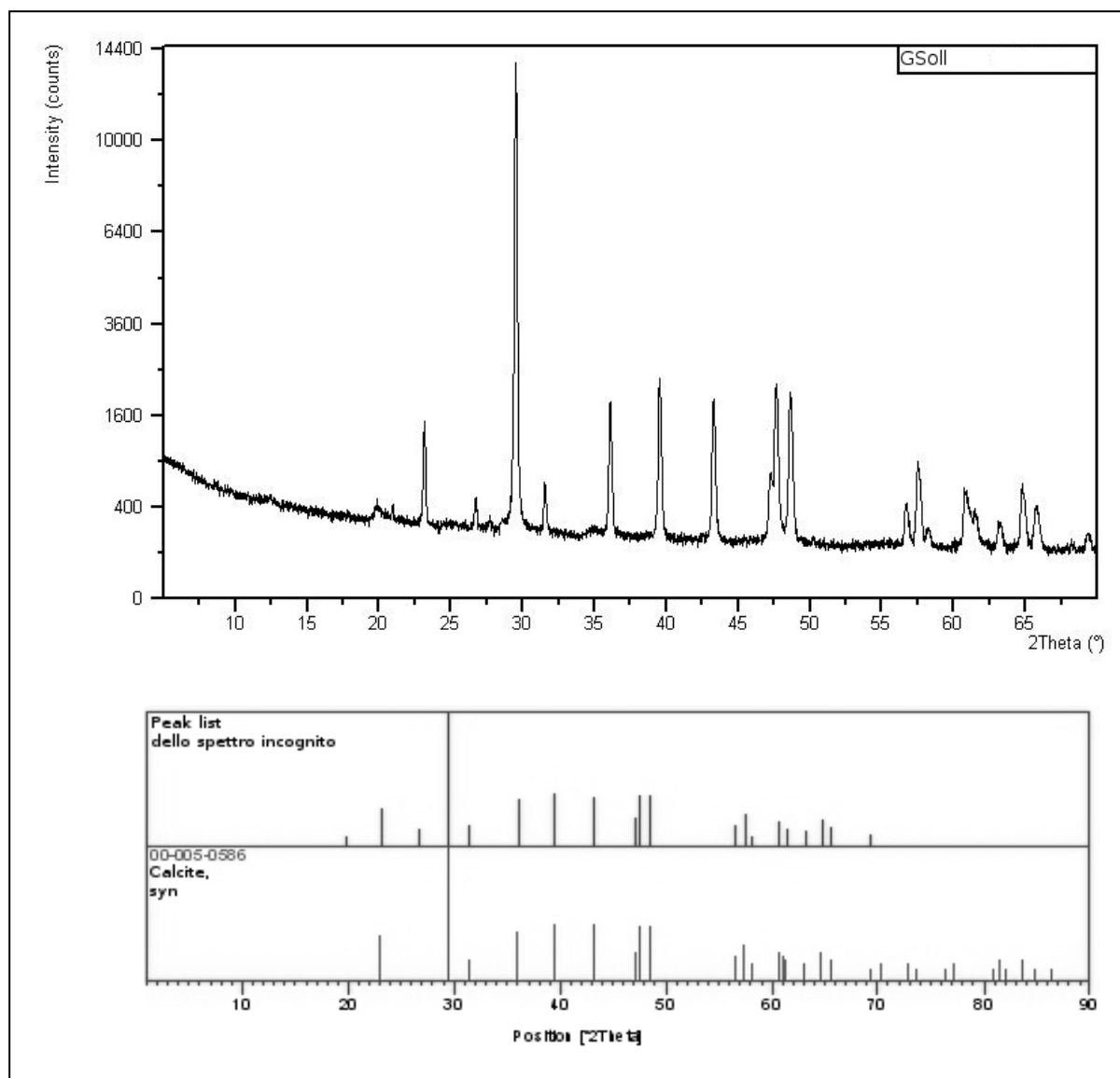


Figura 3.18: Diffrattogramma del campione GSoll.

I diffrattogrammi sopra riportati, evidenziano che i campioni di tutte le tipologie di *Globigerina Limestone* analizzati hanno una composizione monomineralogica data dalla presenza di calcite.

3.2.5 Analisi in microscopia ottica

I campioni di *Globigerina Limestone*, nelle tipologie *Franka* (sottotipi *Franka Safra* o *Franka Yellow* e *Franka Bajda* o *Franka White*) e *Soll*, sono stati analizzati al microscopio ottico. Queste analisi sono state effettuate per studiare le caratteristiche del fabric (tessitura, struttura e orientazione dei diversi componenti) dei campioni delle diverse tipologie.

I campioni analizzati fanno parte della stessa serie utilizzata per le analisi ultrasoniche e termografiche. Tali campioni sono stati rifiniti nei laboratori dell'Università di Cagliari per ottenere le sezioni sottili (Figura 3.19), seguendo lo stesso schema operativo che è stato utilizzato per la preparazione delle sezioni sottili ricavate dai campioni provenienti dal distretto di Cagliari.

Le sezioni analizzate sono sei in totale, due per la tipologia *Soll* (sezioni indicate con le sigle GSolla e GSollb) e quattro per la tipologia *Franka*, di cui due per il sottotipo *Franka Safra* (sezioni indicate con le sigle GFrya e GFryb) e due per il sottotipo *Franka Bajda* (sezioni indicate con le sigle GFrwa e GFrwb). Per ogni tipologia, le due sezioni sono state estratte dallo stesso campione e tagliate l'una ortogonalmente all'altra per evidenziare eventuali stratificazioni o orientazioni di componenti in direzioni preferenziali.



Figura 3.19: Sezioni sottili delle tipologie di *Globigerina Limestone*.

I campioni da cui sono state ricavate le sezioni sottili GFrya e GFryb, provengono dalla cava di *Hal-Kirkop* ($35^{\circ}50'55''N$, $14^{\circ}28'44''E$), prelevati ad una profondità di 25 metri dal piano di campagna, corrispondente a 54 metri sopra il livello del mare.

I campioni da cui sono state ricavate le sezioni sottili GFrwa e GFrwb provengono dalla cava di *Mqabba-Qrendi* ($35^{\circ}50'30''N$, $14^{\circ}27'30''E$), sono stati prelevati ad una profondità di 23 metri dal piano di campagna e 79.1 metri sopra il livello del mare.

Anche i campioni da cui sono state ricavate le sezioni sottili GSolla e GSollb provengono dalla cava di *Mqabba-Qrendi* ma sono stati prelevati ad una profondità di 21.5 metri, corrispondente a 80.6 metri sopra il livello del mare.

La sezione sottile che rappresenta il campione GSolla (Figura 3.20) appartiene alla tipologia di calcare *Globigerina Limestone* denominata *Soll*.

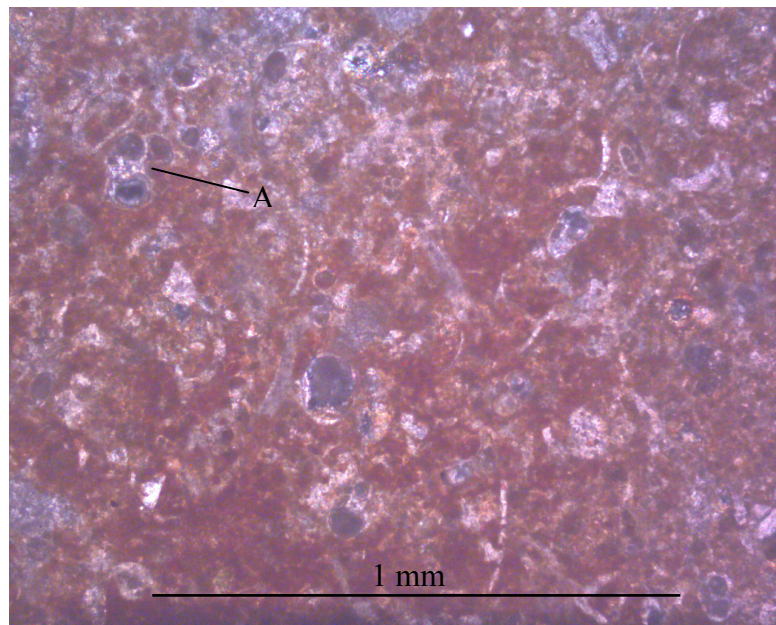


Figura 3.20: Particolare della sezione sottile del campione GSolla (A: bioclasti di *Globigerinae*); ingrandimento $\times 10$.

Questo campione, come si può osservare nella sezione sottile, presenta una grande quantità di micrite, sono osservabili diversi bioclasti, in quantità maggiore del 10%. La roccia in questione mostra una tessitura matrice-sostenuta, seppure con grani di forma sub-arrotondata a volte molto ravvicinati. Prendendo come base la terminologia proposta da Choquette & Pray (1970), la porosità del campione è principalmente interparticellare. Considerata la buona quantità di micrite, che si ritrova in quantità maggiore rispetto alla sparite e considerando la quantità di bioclasti ($> 10\%$) che si possono distinguere in tutta la sezione sottile, utilizzando la classificazione di Folk (1959), possiamo classificare questo campione come una “biomicrite”. Adottando, invece, la classificazione proposta da Dunham (1962) e tenendo conto della tessitura fango-sostenuta distinguibile e della percentuale di grani visibili ($> 10\%$), si può classificare il campione come un *wackestone*. Anche utilizzando la classificazione proposta da Embry & Klovan (1971), ispirata a quella di Dunham, questo campione è stato classificato come *wackestone*.

Sono osservabili, in sezione, resti di macrofossili e soprattutto foraminiferi, tra i quali numerosi *Globigerinidi*, orientati e distribuiti casualmente.

Anche la sezione sottile che rappresenta il campione GSollb (Figura 3.21) appartiene alla tipologia di calcare *Globigerina Limestone* denominata *Soll*, questa sezione è stata ricavata dallo stesso campione da cui è stata ricavata la sezione GSolla, ma è stata tagliata ortogonalmente rispetto a quest'ultima.

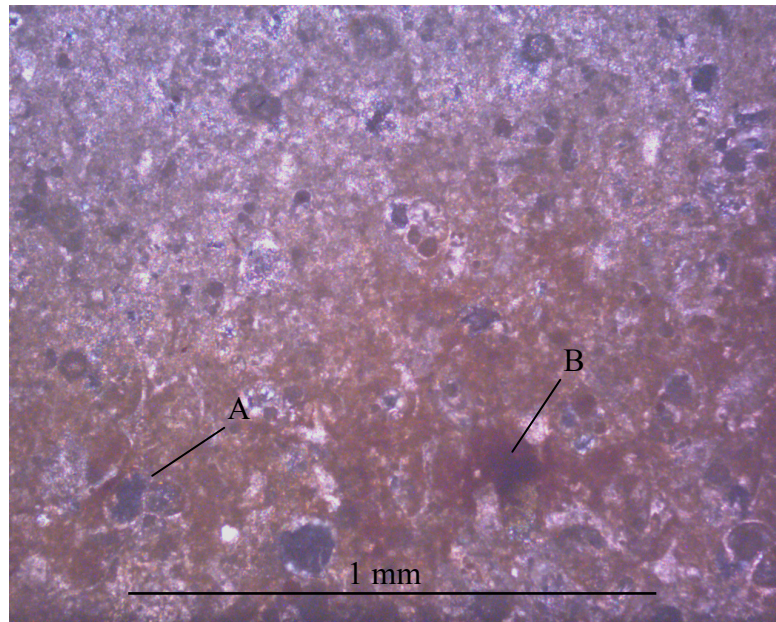


Figura 3.21: Particolare della sezione sottile del campione GSollb (A: bioclasti di *Globigerinae*, B: tracce di ossidazione); ingrandimento $\times 10$.

Anche la sezione GSollb, per quanto riguarda il fabric, possiede le stesse caratteristiche della sezione descritta precedentemente. Come si può osservare nella sezione sottile, il campione presenta una grande quantità di micrite, sono osservabili diversi bioclasti, in quantità maggiore del 10%. Si osserva una tessitura matrice-sostenuta, con grani di forma sub-arrotondata spesso molto ravvicinati.

Utilizzando la terminologia proposta da Choquette & Pray (1970), la porosità del campione è di tipo interparticellare. Considerando che la micrite si ritrova in quantità maggiore rispetto alla sparite e considerando la quantità di bioclasti osservati ($> 10\%$), utilizzando la classificazione di Folk (1959), possiamo classificare anche questa sezione come una “biomicrite”.

Adottando la classificazione proposta da Dunham (1962), tenendo conto della tessitura fango-sostenuta distinguibile e della percentuale di grani visibili ($> 10\%$), si può classificare il campione come un *wackestone*. Anche utilizzando la classificazione proposta da Embry & Klovan (1971), questo campione è stato classificato come *wackestone*.

Nella sezione si possono notare alcuni punti di ossidazione. Sono osservabili, in sezione, foraminiferi, tra i quali molti Globigerinidi, orientati e distribuiti casualmente. Non si osservano orientazioni in direzioni preferenziali di alcun componente della sezione.

La sezione sottile del campione GFrya (Figura 3.22), appartiene alla tipologia di calcare *Globigerina Limestone* denominata *Franka*, nel suo sottotipo *Franka Safra*.

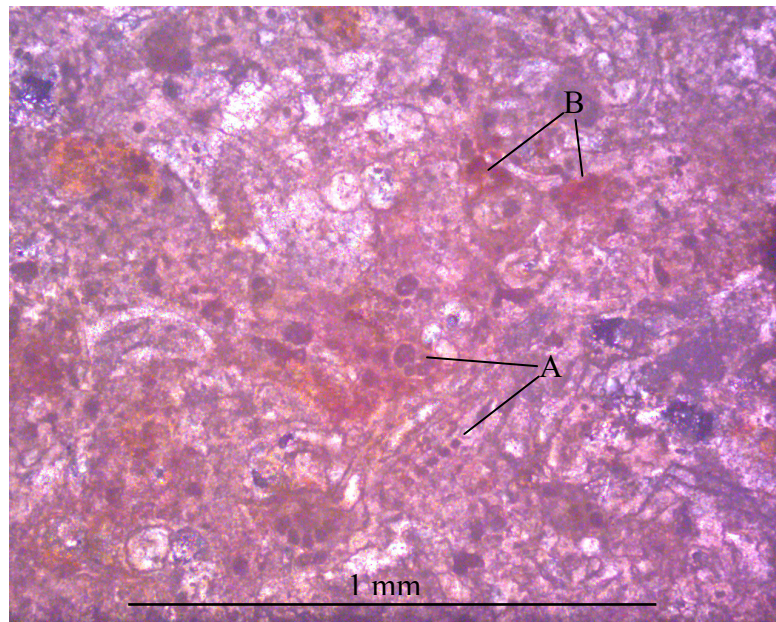


Figura 3.22: Particolare della sezione sottile del campione GFrya (A: bioclasti di *Globigerinae* e altri foraminiferi, B: tracce di ossidazione); ingrandimento $\times 10$.

Il campione è costituito da micrite e calcite spatica (sparite), è ricco di resti organogeni, soprattutto foraminiferi globigerinidi. Sono rilevabili in sezione anche resti di macrofossili.

La sezione sottile presenta zone che sembrerebbero ossidate. Utilizzando la terminologia proposta da Choquette & Pray (1970), la porosità è principalmente del tipo intergranulare, ma localmente si può osservare anche una porosità intragranulare con le camere dei foraminiferi vuote, la forma dei grani è arrotondata.

Vista la pressoché uguale quantità di micrite e sparite osservata, utilizzando la classificazione di Folk (1959), è possibile classificare il campione in questione come una “biosparite scarsamente pulita”.

Utilizzando la classificazione proposta da Dunham (1962), tenendo conto della tessitura grano-sostenuta, si potrebbe classificare il campione come un *packstone*. Anche utilizzando la classificazione proposta da Embry & Klovan (1971), questo campione è stato classificato

come *packstone*, infatti è presente una percentuale minore del 10% di componenti con dimensioni > 2mm.

La sezione sottile che rappresenta il campione GFryb (Figura 3.23) che appartiene alla tipologia di calcare *Globigerina Limestone* denominata *Franka*, nel suo sottotipo *Franka Safra*. Questa sezione è stata ricavata dallo stesso campione da cui è stata ricavata la sezione GFrya, ma è stata tagliata perpendicolarmente rispetto a quest'ultima.

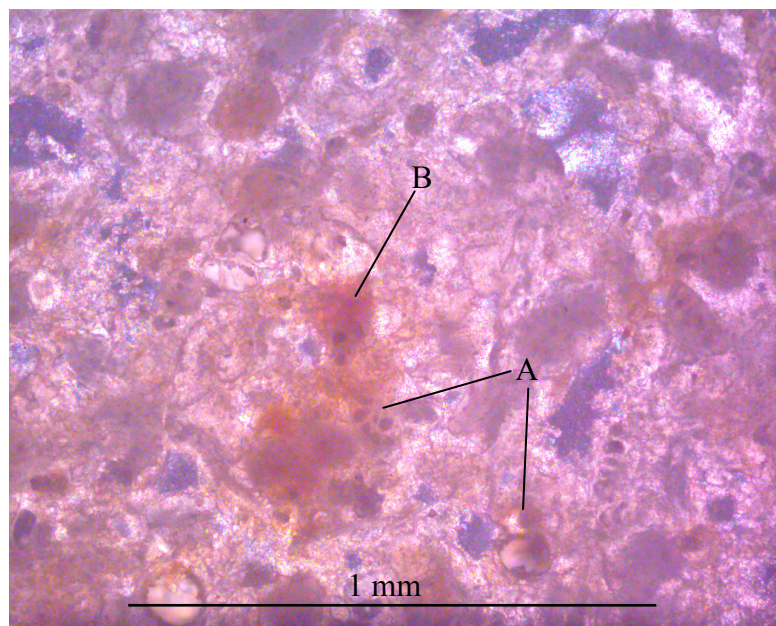


Figura 3.23: Particolare della sezione sottile del campione GFryb (A: bioclasti di *Globigerinae*, B: zone di ossidazione); ingrandimento $\times 10$.

Questa sezione, per quanto riguarda il fabric, presenta le stesse caratteristiche della precedente. È costituito da micrite e calcite spatica, è ricco di foraminiferi globigerinidi e presenta anche resti di macrofossili. La sezione sottile presenta zone di sospetta ossidazione. Utilizzando la terminologia proposta da Choquette & Pray (1970), la porosità è principalmente del tipo intergranulare, ma localmente si può osservare anche una porosità intragranulare con le camere dei foraminiferi vuote, la forma dei grani è arrotondata.

Possiede una pressoché uguale quantità di micrite e sparite. Anche in questo caso, utilizzando la classificazione di Folk (1959), è possibile classificare il campione in questione come una “biosparite scarsamente pulita”. Utilizzando la classificazione proposta da Dunham (1962), tenendo conto della tessitura grano-sostenuta, si potrebbe classificare il campione come un *packstone*. Anche utilizzando la classificazione proposta da Embry & Klovan (1971), questo campione è classificabile come un *packstone*, infatti è presente una percentuale minore del

10% di componenti con dimensioni > 2mm. I bioclasti osservati sono orientati e distribuiti casualmente. Non si osservano orientazioni in direzioni preferenziali di alcun elemento della sezione.

La sezione sottile del campione GFrwa (Figura 3.24), appartiene alla tipologia di calcare *Globigerina Limestone* denominata *Franka*, nel suo sottotipo *Franka Bajda*.

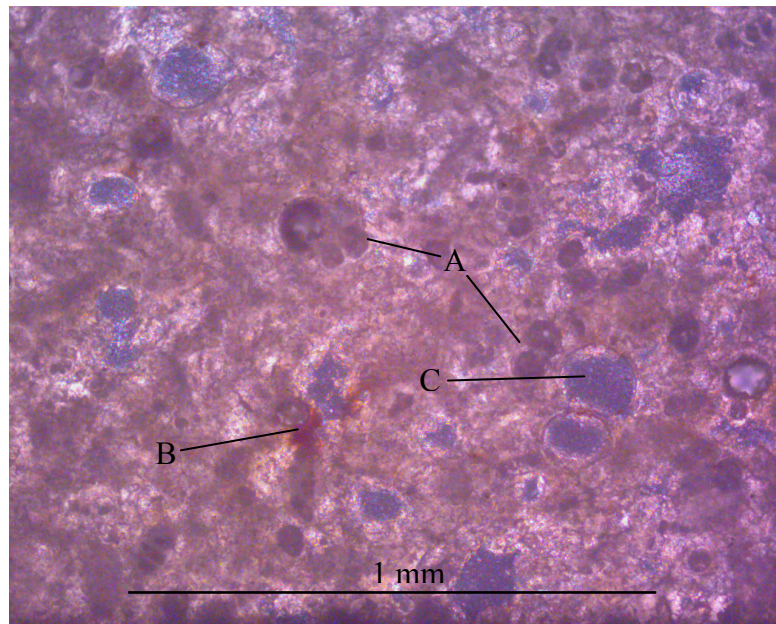


Figura 3.24: Particolare della sezione sottile del campione GFrwa (A: bioclasti di *Globigerinae*, B: zona di ossidazione, C: porosità intragranulare nella camera di *Globigerinae* vuota); ingrandimento $\times 10$.

Nella sezione sottile del campione si osserva sia micrite che calcite spatica, la sezione è ricca di bioclasti, per la maggior parte foraminiferi globigerinidi. Nella sezione sottile si osservano rare zone di ossidazione.

Tenendo conto della terminologia proposta da Choquette & Pray (1970), la porosità è principalmente del tipo intergranulare, ma in varie zone si può osservare anche una porosità intragranulare (nelle camere vuote dei foraminiferi, particolare C in Figura 3,25). Si osserva una uguale quantità di micrite e sparite, la forma dei grani è arrotondata.

Utilizzando la classificazione di Folk (1959), si può classificare questo campione come una “biosparite scarsamente pulita”. Utilizzando la classificazione proposta da Dunham (1962) e tenendo conto della tessitura grano-sostenuta, si potrebbe classificare il campione come un *packstone*. Anche utilizzando la classificazione proposta da Embry & Klovan (1971),

possiamo classificare questo campione come *packstone*. È presente una percentuale minore del 10% di componenti con dimensioni > 2mm.

La sezione sottile che rappresenta il campione GFrwb (Figura 3.25) appartiene alla tipologia di calcare *Globigerina Limestone* denominata *Franka*, nel suo sottotipo *Franka Bajda*, questa sezione è stata ricavata dallo stesso campione da cui è stata ricavata la sezione GFrwa, ma è stata tagliata ortogonalmente rispetto a quest'ultima.

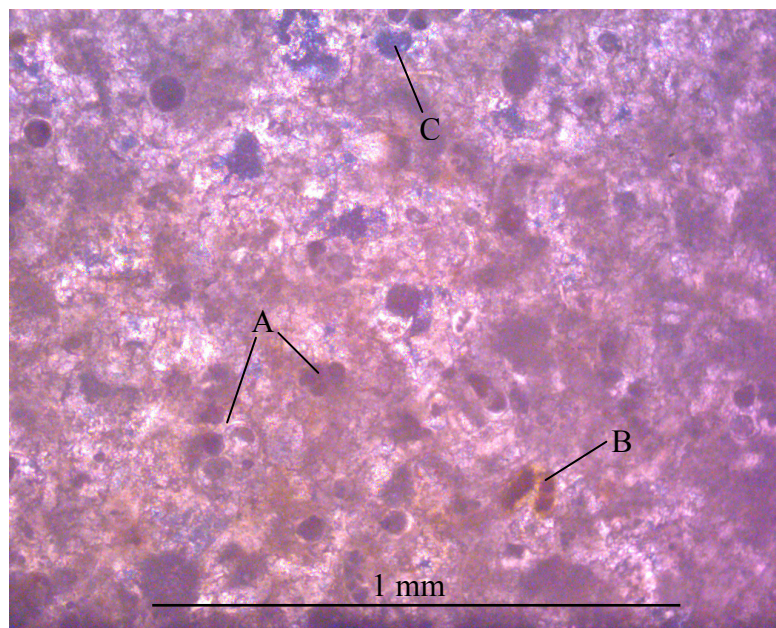


Figura 3.25: Particolare della sezione sottile del campione GFrwb (A: bioclasti di *Globigerinae*, B: zona di ossidazione, C: porosità intragranulare nella camera di *Globigerinae* vuota); ingrandimento $\times 10$.

Le caratteristiche del fabric osservabili in questo campione, sono le stesse del precedente. La sezione è costituita da micrite e calcite spatca, è ricca di foraminiferi globigerinidi e presenta anche resti di macrofossili. Si possono osservare zone di ossidazione.

Utilizzando la terminologia proposta da Choquette & Pray (1970), la porosità è principalmente del tipo intergranulare, ma localmente si può osservare anche una porosità intragranulare con le camere dei foraminiferi vuote, la forma dei grani è arrotondata. Possiede una uguale quantità di micrite e sparite.

Anche in questo caso, utilizzando la classificazione di Folk (1959), è possibile classificare il campione in questione come una “biosparite scarsamente pulita”. Utilizzando la classificazione proposta da Dunham (1962), tenendo conto della tessitura grano-sostenuta, si potrebbe classificare il campione come un *packstone*. Anche utilizzando la classificazione

proposta da Embry & Klovan (1971), si può classificare questo campione come un *packstone*, è presente una percentuale minore del 10% di componenti con dimensioni > 2mm.

Si può affermare, inoltre, che dall'osservazione di tutte le sezioni non si è riscontrata alcuna evidenza di orientazione preferenziale degli elementi costituenti. Non è stato possibile stimare in modo visivo la mesoporosità dei campioni di *Globigerina Limestone* in quanto le sezioni sottili, causa la scarsa coerenza di questa litologia, apparivano deteriorate in taluni settori. In tabella 3.7 sono state riassunte le caratteristiche tessiturali osservate nelle sezioni sottili dei campioni.

<i>Sigla campione</i>	<i>GSolla (Soll)</i>	<i>GSollb (Soll)</i>	<i>GFrya (Franka Safra)</i>	<i>GFryb (Franka Safra)</i>	<i>GFrwa (Franka Bajda)</i>	<i>GFrwb (Franka Bajda)</i>
<i>Litotipo</i>	Calcere tenero e quasi puro (<i>auct.</i>)	Calcere tenero e quasi puro (<i>auct.</i>)	Calcere tenero e quasi puro (<i>auct.</i>)	Calcere tenero e quasi puro (<i>auct.</i>)	Calcere tenero e quasi puro (<i>auct.</i>)	Calcere tenero e quasi puro (<i>auct.</i>)
<i>Tessitura dei grani</i>	matrice-sostenuta	matrice-sostenuta	grano-sostenuta	grano-sostenuta	grano-sostenuta	grano-sostenuta
<i>Forma dei grani</i>	sub-arrotondata	sub-arrotondata	arrotondata	arrotondata	arrotondata	arrotondata
<i>Tipo di porosità secondo Choquette & Pray (1970)</i>	intergranulare	intergranulare	intergranulare e parzialmente intragranulare	intergranulare e parzialmente intragranulare	intergranulare e parzialmente intragranulare	intergranulare e parzialmente intragranulare
<i>Classificazione secondo Folk (1959)</i>	Biomicroite	Biomicroite	Biosparite scarsamente pulita	Biosparite scarsamente pulita	Biosparite scarsamente pulita	Biosparite scarsamente pulita
<i>Classificazione secondo Dunham (1962)</i>	<i>Wackestone</i>	<i>Wackestone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Packstone</i>
<i>Classificazione secondo Embry & Klovan (1971)</i>	<i>Wackestone</i>	<i>Wackestone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Packstone</i>

Tabella 3.7: Caratteristiche del fabric dei campioni in sezione sottile.

3.2.6 Misure di densità assoluta

Le misure dirette del volume e della densità dei campioni di *Globigerina Limestone* sono state effettuate tramite picnometro a elio Quantachrome Ultrapycnometer 1000, in dotazione ai laboratori del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Cagliari. Sono stati analizzati dei campioni di forma cubica con misure di 15 mm di lato e peso di circa 9 grammi. I campioni sottoposti a queste misure sono indicati con le sigle: GFry (*Franka Safra*), GFrw (*Franka Bajda*) e GSoll (*Soll*).

Per ogni tipologia di campione sono state preparate sei porzioni di polvere e su ognuna di esse sono state effettuate le misure picnometriche. Successivamente sono state calcolate le medie delle misure.

<i>Sample</i>	<i>Average volume</i> (cm ³)	<i>Weight</i> (g)	<i>Average density</i> (g/cm ³)	<i>Volume standard deviation</i> (%)
GFry.a	3.1275	8.4926	2.7155	0.0010
GFry.b	2.9560	8.0301	2.7166	0.0018
GFry.c	2.8094	7.6144	2.7104	0.0006
GFry.d	2.9228	7.9318	2.7138	0.0014
GFry.e	2.4002	6.5287	2.7200	0.0014
GFry.f	2.6184	7.0307	2.6851	0.0016
GFrw.a	3.1990	8.7422	2.7328	0.0016
GFrw.b	3.0382	8.3626	2.7525	0.0023
GFrw.c	3.0350	8.3640	2.7558	0.0014
GFrw.d	3.1431	8.5592	2.7232	0.0068
GFrw.e	2.7823	7.5478	2.7128	0.0005
GFrw.f	3.0425	8.3812	2.7547	0.0033
GSoll.a	3.4482	9.2983	2.6966	0.0020
GSoll.b	3.3915	9.2333	2.7225	0.0022
GSoll.c	3.0698	8.3359	2.7154	0.0020
GSoll.d	2.8744	7.7889	2.7097	0.0012
GSoll.e	3.1662	8.5397	2.6972	0.0009
GSoll.f	3.3629	9.0352	2.6867	0.0010

Tabella 3.8: Risultati delle misure di densità.

Come si può osservare in tabella 3.9, dove sono illustrate le medie delle misure picnometriche, il campione GFry ha una densità assoluta media di 2,7103 g/cm³, il campione GFrw ha una densità assoluta media di 2,7386 g/cm³ e il campione GSoll di 2,7045 g/cm³.

<i>Sample</i>	<i>Average volume</i> (cm ³)	<i>Weight</i> (g)	<i>Average density</i> (g/cm ³)
GFry (<i>Franka Safra</i>)	2.8057	7.6047	2.7103 (2710.3 kg/m ³)
GFrw (<i>Franka Bajda</i>)	3.0400	8.3261	2.7386 (2738.6 kg/m ³)
GSoll (<i>Soll</i>)	3.2188	8.7052	2.7045 (2704.5 kg/m ³)

Tabella 3.9: Medie delle misure di densità per ogni campione.

3.2.7 Misure di assorbimento d'acqua

Per osservare la capacità di assorbimento generale dei diversi tipi di *Globigerina Limestone*, sono state effettuate delle prove di assorbimento per immersione su campioni di *Franka Safra* (*Franka Y*), *Franka Bajda* (*Franka W*) e *Soll* delle stesse misure di quelli utilizzati per le misure termografiche in laboratorio. I campioni sono stati pesati con una bilancia elettronica di precisione, prima allo stato secco e successivamente dopo immersione completa in acqua in vasca di stagionatura (ad una temperatura costante, tra i 24° C e i 25° C). Le pesate allo stato saturo sono state effettuate a diverse cadenze temporali (dopo 48, 120, 192, 288, 312, 336 e 360 ore), fino alla stabilizzazione del peso dei campioni. Nella tabella 3.10 sono riportati i pesi medi dei campioni, si nota che i campioni di *Soll* assorbono meno acqua rispetto ai campioni di *Franka Safra* (Y) e *Franka Bajda* (W).

Sample	Weight (g) 22/06/11	Weight (g) 24/06/11	Increase g	Weight (g) 27/06/11	Partial increase g	Weight (g) 28/06/11	Partial increase g	Weight (g) 30/06/11	Partial increase g	Weight (g) 04/07/11	Partial increase g	Weight (g) 05/07/11	Partial increase g	Weight (g) 07/07/11	Partial increase g
	am- (dry)	am- (wet)		am- (wet)		am- (wet)		am- (wet)		am- (wet)		am- (wet)		am- (wet)	
<i>Franka Y</i>	4049.70	4608.80	559.10	4630.50	21.70	4636.10	5.60	4641.50	5.40	4653.00	11.50	4655.80	2.80	4656.70	0.40
<i>Franka W</i>	4030.40	4636.90	606.50	4655.70	18.80	4665.10	9.40	4670.10	5.00	4681.00	10.90	4683.50	2.50	4684.00	0.30
<i>Soll</i>	4281.70	4762.20	480.50	4769.70	7.50	4775.20	5.50	4777.70	2.50	4785.50	7.80	4788.50	3.00	4788.50	0.00

Tabella 3.10: Pesi e incrementi di peso dei campioni posti in immersione alle diverse cadenze temporali.

Nei grafici riportati in figura 3.26 si illustrano gli incrementi di peso in percentuale per le tre tipologie di campioni. Come si può notare nell'istogramma in figura 3.26 b, a prova conclusa, i campioni di *Soll* hanno incrementato il loro peso del 11,84%, contro il 14,99% e il 16,22% dei campioni di *Franka Safra* (Y) e *Franka Bajda* (W).

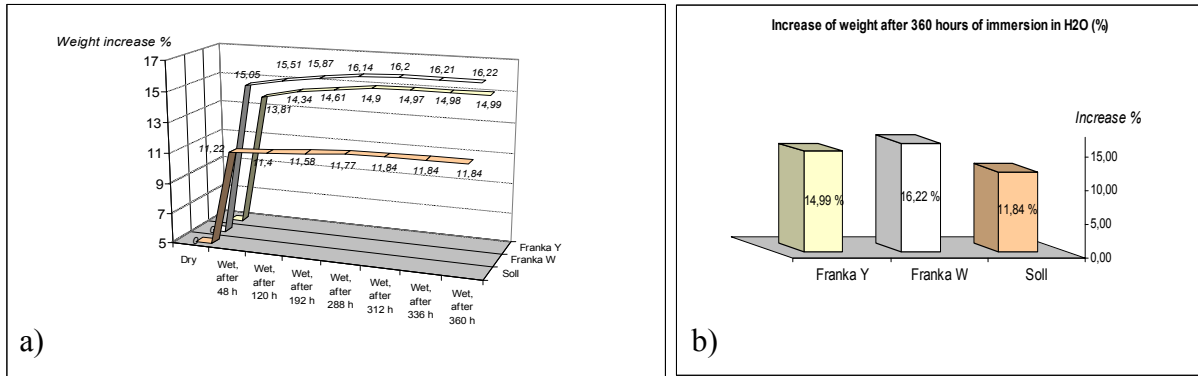


Figura 3.26: (a) grafico dell'incremento percentuale del peso per i tre campioni; (b) istogramma della percentuale di incremento di peso a prova conclusa.

Come evidenziato anche nel caso delle misure termografiche di laboratorio, precedentemente illustrate, anche in queste misure, i campioni *Franka Safra* (Y) e *Franka Bajda* (W) mostrano caratteristiche di assorbimento simili, invece, i campioni della tipologia *Soll* assorbono sensibilmente meno acqua rispetto alle altre due tipologie.

Anche in altri studi effettuati nei diversi tipi di *Globigerina Limestone* (e.g. Fitzner *et alii*, 1996) è stato verificato che la tipologia *Franka* ha una maggiore percentuale di risalita capillare e una maggiore velocità di assorbimento rispetto alla tipologia *Soll*.

3.3 RILIEVI ULTRASONICI E TERMOGRAFICI IN SITO

Introduzione

La salvaguardia dei monumenti del bacino Mediterraneo è di primaria importanza per la cultura e per l'economia dei paesi che ne fanno parte. Uno degli obiettivi di questo studio è quello di studiare, principalmente con metodi non distruttivi, le caratteristiche dei calcari oligo-miocenici largamente utilizzati nell'edificazione di molte strutture monumentali dei paesi mediterranei. Per poter sviluppare questo studio è stato utile confrontare le caratteristiche fisiche, che influenzano le dinamiche di degrado delle litologie che compongono alcuni monumenti di due importanti isole del Mediterraneo, la Sardegna e Malta. In tutte e due le isole sono presenti molte strutture monumentali edificate con i calcari della serie oligo-miocenica. Pertanto, si sono potute confrontare le caratteristiche dei calcari utilizzati nel distretto di Cagliari con quelle dei calcari maltesi, mediante tecniche diagnostiche non distruttive, prevalentemente di tipo acustico, integrate con tecniche termografiche e minero-petrografiche, per una calibrazione dei dati.

Nei paragrafi seguenti si illustrano le analisi in sito effettuate su degli elementi strutturali di due importanti strutture maltesi, che sono state edificate con l'utilizzo del *Globigerina Limestone*, ossia l'antica sede universitaria ed ex Collegio dei Gesuiti a Valletta e la *Faculty for the Built Environment*, struttura che fa parte del Campus Universitario di Msida. Con tale sperimentazione ci si è proposti di confrontare lo stato di conservazione delle due strutture, una di interesse storico-monumentale e una attuale, verificando l'efficacia delle tecniche di indagine nelle due diverse situazioni.

Inoltre, allo scopo di migliorare l'analisi diagnostica, è stata effettuata un'analisi integrata della tecnica ultrasonica con la tecnica termografica. Tale metodologia ha permesso di individuare correlazioni utili tra le mappe di velocità ultrasonica e i termogrammi relativi ai settori investigati migliorando la fase interpretativa dei dati. La tecnica termografica permette di investigare la parte superficiale dei paramenti esterni delle strutture murarie in esame, anche fornendo informazioni sulla presenza differenziale dell'umidità. Mentre la tecnica ad ultrasuoni, permette di investigare anche le parti più profonde delle strutture investigate.

3.3.1 Edifici oggetto di studio

La prima struttura oggetto di indagine in sito è l'antica sede universitaria ed ex collegio dei Gesuiti a Valletta.

Durante il Concilio di Trento, che si tenne tra il 1545 e il 1563, si decise che ogni diocesi dovesse avere dei propri seminari. Trent'anni dopo, il Vescovo Gargallo ordinò un sinodo e decise che si sarebbe dovuto erigere un seminario in territorio maltese, così, Papa Clemente VIII ordinò che venisse costruito il primo collegio dei Gesuiti il più presto possibile.

Dopo varie vicissitudini, per problemi di carattere economico e per via di dissidi dovuti alla decisione su dove erigere la costruzione, il Vescovo Gargallo, con la piena approvazione del Gran Maestro Hughes de Verdalle, permise al Generale dei Gesuiti Fr. Claudio Aquaviva di fare approdare a Malta una piccola comunità di Gesuiti per avviare la costruzione del collegio. Quindi, Fr. Claudio Aquaviva fondò solennemente il collegio a Valletta il 12 Novembre del 1592, nominando Superiore Fr. Pietro Casati. Quattro mesi dopo, l'8 Marzo del 1593, ci fu la cerimonia di inaugurazione e il nuovo collegio fu chiamato "Collegium Melitense Societatis Jesu", l'atto di fondazione fu regolarmente confermato dal Papa il 29 Marzo 1593. Circa ventisei anni prima, l'architetto Francesco Lapparelli da Cortona (1521-1570), Ingegnere militare e pianificatore urbano, insieme all'Architetto Girolamo Cassar (1520-1592), progettarono l'impostazione paesistico-architettonica della nuova città che doveva sorgere nella "penisola di Sciberras" a Malta (dove sorge l'odierna Valletta). La mappatura della nuova città prevedeva una grande maglia a scacchiera, composta da varie aree edificabili di forma rettangolare. L'area numero 24 fu assegnata ai Gesuiti e destinata alla costruzione del collegio e della chiesa adiacente. Nel 1592, l'Architetto ufficiale dell'Ordine dei Gesuiti, Padre Giuseppe Valeriano (1542-1596), progettò il collegio e la chiesa adiacente in tipico stile Rinascimentale. Successivamente, dopo raccomandazioni dell'alta curia, l'Architetto fu costretto a modificare il suo progetto, ingrandendo la pianta del collegio e riducendo la pianta della chiesa.

La costruzione del collegio e della chiesa iniziò tre mesi dopo. La posa della prima pietra avvenne in una cerimonia solenne per mano del Gran Maestro Martin Garzes il 12 Settembre 1595. Nel 1597, quando la struttura era già quasi completamente completata, i primi Gesuiti iniziarono a soggiornarvi.

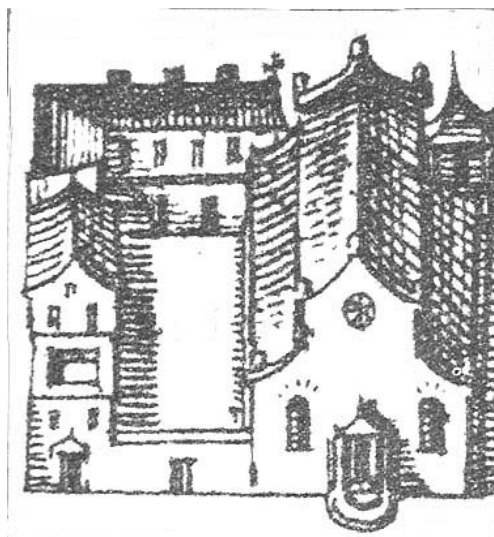


Figura 3.27: Antica raffigurazione del Collegio dei Gesuiti a Valletta (diciottesimo secolo), <http://www.malta-canada.com/churches-chapels/Images/Malta/VallJesuits18thcent.jpg>.

L'architettura originaria del collegio e della chiesa subì delle modificazioni nel tempo, rese necessarie da riparazioni effettuate dopo danni subiti dalla struttura per via di vari incidenti, come esplosioni accidentali, incendi, terremoti etc.

Successivamente ci furono dei dissidi tra i Gesuiti e l'ordine dei Cavalieri di Malta, che provocarono anche la chiusura temporanea del collegio nel 1639. Il collegio fu riaperto dopo breve tempo e il numero degli studenti crebbe considerevolmente, fu così che dal 1727, il "Collegium Melitense", grazie all'approvazione del Papa, acquisì la forma definitiva di Università -seppure virtuale-, potendo concedere ufficialmente le lauree in varie discipline (Azzopardi, 2002). Attualmente la struttura è utilizzata regolarmente come principale sede universitaria di Malta.

Per quanto riguarda la sperimentazione su una struttura moderna, si è scelto un muro del paramento esterno dei laboratori della *Faculty for the Built Environment*, struttura che fa parte del Campus Universitario di Msida. La struttura fu costruita tra gli anni 1990 e 1993 utilizzando, per i muri perimetrali, dei blocchi di *Globigerina Limestone* ben selezionati. La struttura appare in generale in buono stato di conservazione e non ha ancora una valenza storica, ma è stata scelta proprio per la sua contemporaneità.

3.3.2 Antica sede universitaria di Valletta

Le sperimentazioni realizzate in sito nell'ex Collegio dei Gesuiti e oggi sede universitaria a Valletta (Figura 3.28), sono state effettuate mediante una campagna di rilievi ad ultrasuoni integrata con una indagine termografica. La porzione di struttura esaminata fa parte del cortile interno della sede universitaria che si affaccia su St. Paul Street, ed è costituita da un pilastro portante con esposizione NE.

La struttura in esame, come la quasi totalità delle strutture presenti a Malta, è costituita interamente da conci di *Globigerina Limestone* allettati con malte a base di calce.

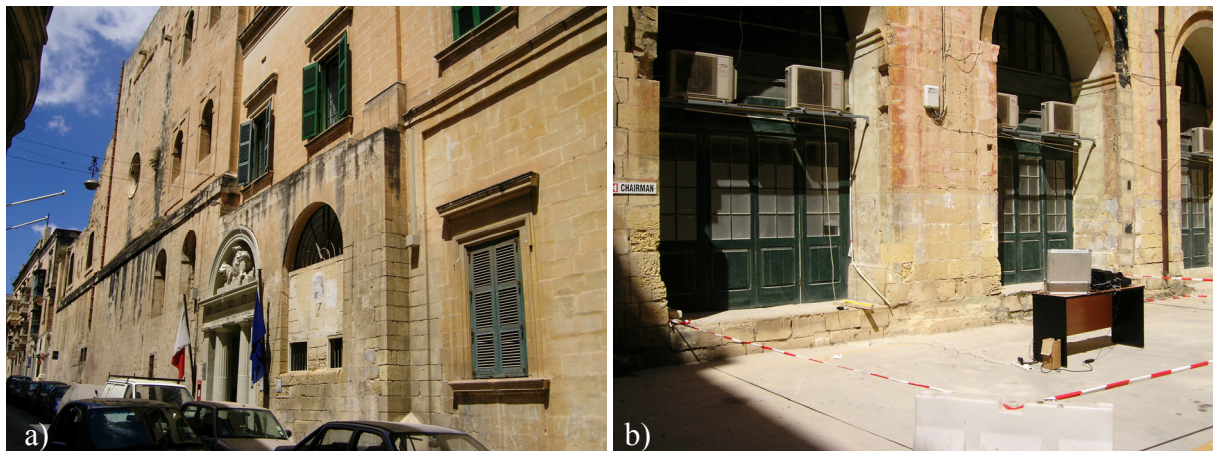


Figura 3.28: Ex Collegio dei Gesuiti e oggi sede universitaria di Valletta, (a) facciata e (b) cortile interno.

Analisi ultrasoniche

Per le misurazioni ultrasoniche è stato utilizzato lo strumento P.U.N.D.I.T., lo stesso impiegato per le misure effettuate in laboratorio sui campioni. Per la realizzazione dei rilievi su questa struttura, è stata applicata la modalità indiretta e la tecnica di acquisizione *step by step*, mantenendo l'*offset* costante (20 cm) e spostando il trasmettitore ed il ricevitore su posizioni successive. Questo procedimento è stato eseguito su 6 diversi profili orizzontali distanziati 20 cm l'uno dall'altro. Su ogni profilo sono stati individuati 15 punti di misura e su ognuno di essi sono state effettuate diverse misure, al fine di acquisire dati che fossero il più possibile affidabili (Figura 3.29). L'analisi è stata eseguita utilizzando trasduttori da 54 kHz. Come già spiegato nei paragrafi introduttivi, la profondità di indagine ultrasonica è inversamente proporzionale alla frequenza dei trasduttori. Utilizzando trasduttori da 54 kHz si riescono ad investigare porzioni di profondità adeguata dei materiali con una buona risoluzione nella definizione dei difetti incontrati dall'impulso ultrasonico. Scegliendo trasduttori con frequenza più bassa, si può raggiungere una maggiore profondità di indagine, ma si ha una minore risoluzione nella definizione dei difetti, vuoti etc. In questo caso, con

l'utilizzo di trasduttori da 54 kHz, si è quindi trovato un buon compromesso tra una profondità di indagine adeguata all'analisi e una buona definizione dei potenziali difetti.

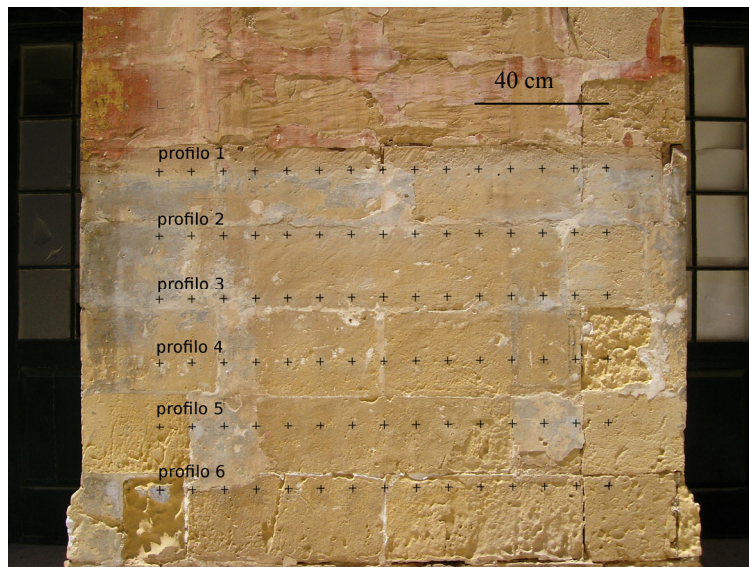


Figura 3.29: Schema di acquisizione dei dati ultrasonici.

Come materiale di accoppiamento è stato utilizzato un gel per ultrasuoni, idrosolubile e atossico. Le tracce di gel sono state accuratamente eliminate dopo le misure, al fine di non arrecare danni alla struttura. Dopo avere effettuato le procedure previste dalle norme (Normal 22/86, 1987, Misura della velocità di propagazione del suono) e ottenuto i tempi di transito dei segnali ultrasonici dal trasmettitore al ricevitore, sono state calcolate le velocità di propagazione degli impulsi longitudinali tramite la formula $V = \frac{l}{t}$ (dove V = velocità longitudinale; l = distanza tra emettitore e ricevitore; t = tempo di transito dell'onda longitudinale). Successivamente, mediante interpolazione delle velocità calcolate in una griglia regolare per mezzo di un software dedicato, sono state costruite le mappe di distribuzione della velocità ultrasonica.

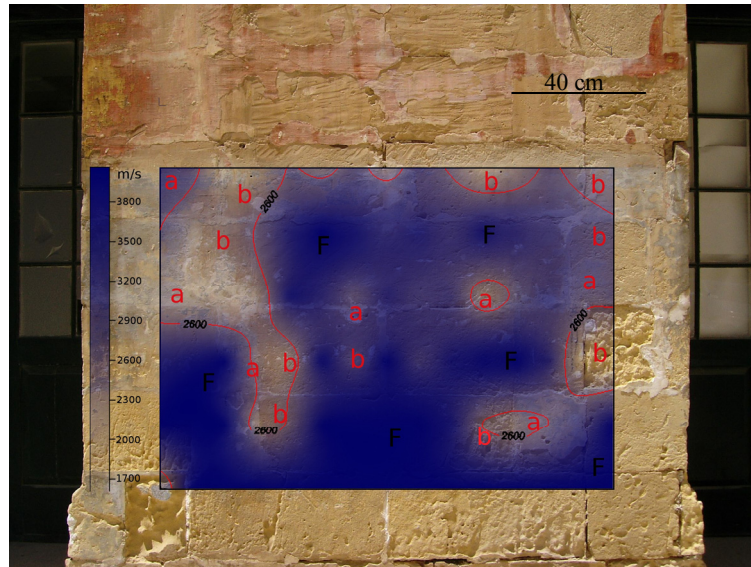


Figura 3.30: Mappa delle velocità ultrasoniche.

L'analisi della rappresentazione relativa alla distribuzione delle velocità ultrasoniche (Figura 3.30), ha fornito un quadro sintetico delle condizioni elastiche dei materiali e, di conseguenza, informazioni sullo stato di conservazione dei materiali costruttivi del paramento in studio. Sono presenti diverse zone a bassa velocità (meno di 2600 m/s) che denotano scarse caratteristiche elastiche correlabili con zone alterate (lettere "a" e "b" nella mappa in figura 3.30). Le aree indicate con "a" sono ricoperte da intonaco, quelle indicate con "b" sono quelle in cui si è verificato il distacco degli intonaci o questi non sono in buone condizioni elastiche. Per quanto riguarda le aree indicate con "a" (Figura 3.31 a), si può considerare che la diminuzione dei valori di velocità degli impulsi ultrasonici può essere causata dalla non perfetta aderenza dell'intonaco al materiale sottostante, effetto causato, probabilmente, anche da presenza di umidità. Tuttavia, considerando la natura dei materiali costruttivi, si ritiene probabile che il degrado degli intonaci si estenda anche ai materiali sottostanti. Alla luce di queste considerazioni si deduce che gli interventi conservativi, effettuati in tempi remoti, non siano stati del tutto efficaci.

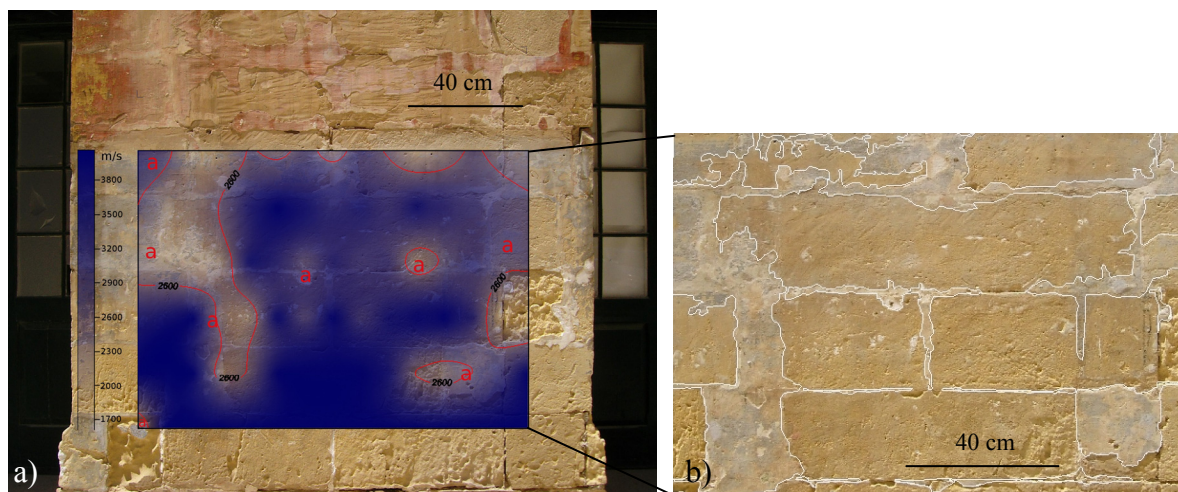


Figura 3.31: (a) mappa delle velocità ultrasoniche, (b) aree ricoperte da intonaco evidenziate da tratto bianco.

Considerando la stretta relazione tra velocità di propagazione degli impulsi longitudinali e le caratteristiche del mezzo attraversato, si può ragionevolmente dedurre che le zone che presentano velocità ultrasoniche longitudinali più elevate (zone indicate con F nella figura 3.30), siano quelle con buone caratteristiche elastiche e quindi in buone condizioni di conservazione. Infatti, gli elevati valori di velocità riscontrati in alcune zone della struttura investigata sono compatibili con quelli misurati in laboratorio su campioni di roccia sana della tipologia *Franka*.

Analisi termografiche

Per acquisire ulteriori elementi conoscitivi sullo stato di conservazione dei materiali più superficiali costituenti la struttura muraria, è stata effettuata un'analisi termografica. Questo tipo di analisi permette l'individuazione di zone di accumulo di umidità che possono influenzare negativamente lo stato di conservazione dei materiali determinandone o accelerandone il degrado.

Per l'analisi termografica è stata utilizzata la termocamera Agema THV 1000 (la stessa utilizzata per le misure di laboratorio) e la cosiddetta "tecnica passiva" (sfruttando l'irraggiamento solare). Le operazioni sono state eseguite effettuando varie riprese (*shot*) in diverse condizioni di irraggiamento solare, infatti i primi *shot* sono stati effettuati mentre la superficie del pilastro era in fase di riscaldamento perché sottoposta ad irraggiamento solare (durante la mattina fino alle 12), (Figura 3.32), gli altri *shot* sono stati effettuati mentre la superficie era in fase di raffreddamento e di cessione di calore (dalle 12 in poi, quando il sole risultava nascosto dalla struttura, mettendo in ombra il pilastro), (Figura 3.33).

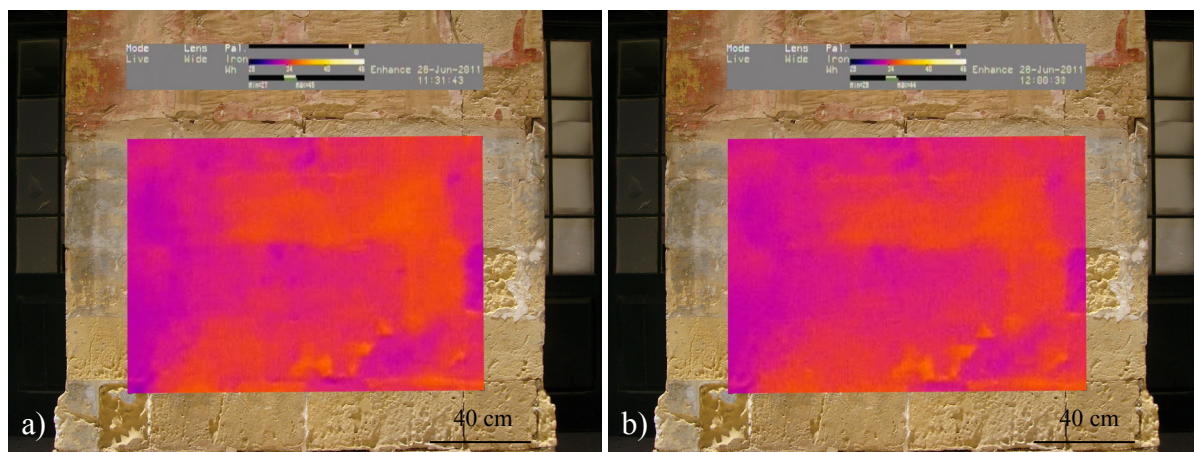


Figura 3.32: Termogrammi della superficie del pilastro in fase di riscaldamento (a: *shot* effettuato alle 11:31, b: *shot* effettuato alle 12:00).

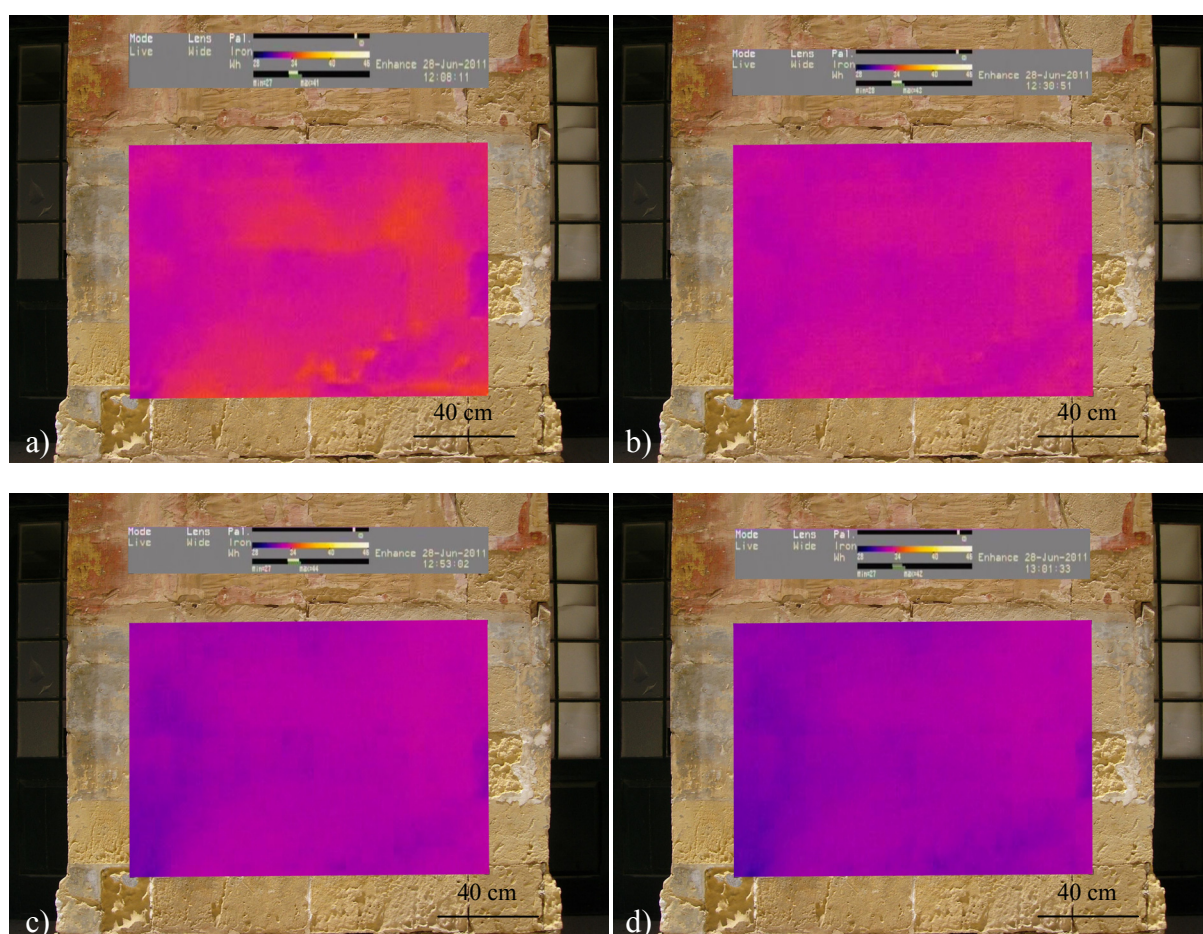


Figura 3.33: Termogrammi della superficie del pilastro in fase di raffreddamento (a: *shot* effettuato alle 12:08, b: 12:30, c: 12:53 e d: 13:01).

I termogrammi effettuati dopo le 13:01 (Figura 3.34) erano tutti molto simili e descrivevano essenzialmente un quadro di raffreddamento finale del paramento esterno, fino a al raffreddamento completo osservato alle 15:31 (Figura 3.34 b).

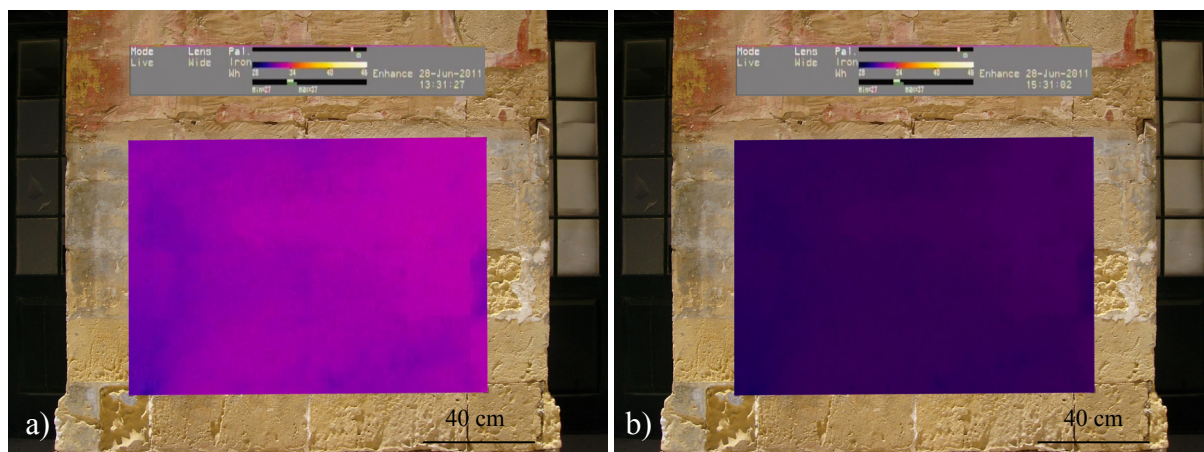


Figura 3.34: Termogrammi della superficie del pilastro nelle ultime fasi di raffreddamento (a: *shot* effettuato alle 13:31, b: 15:31).

Da una prima osservazione dei termogrammi, si possono individuare le aree a diversa emissività termica. Una volta effettuata l'analisi dei termogrammi relativi alle diverse riprese (in riscaldamento e in raffreddamento) si può osservare che in generale la distribuzione delle anomalie termiche rimane pressoché invariata nell'intervallo temporale analizzato. Nell'analisi dei termogrammi, è necessario tenere conto che la distribuzione della temperatura è influenzata sensibilmente anche dalle caratteristiche di rugosità superficiale dei materiali. Pertanto, per facilitarne l'analisi interpretativa, in figura 3.35, viene riportato il termogramma della struttura investigata con elementi dedotti dall'analisi macroscopica.



Figura 3.35: Termogramma della superficie del pilastro.

In questo caso, grazie alle analisi termografiche di laboratorio, si è potuto mettere in relazione la diminuzione delle temperature rilevate in alcune zone della struttura in esame con la presenza di umidità (zone indicate con “C” in figura 3.35). Le zone che presentano temperature più elevate sono, verosimilmente, quelle che hanno minori problemi di degrado (zone indicate con “F” nella mappa in figura 3.35). Queste ultime sono le zone dove, sulla base dei risultati delle misure termografiche di laboratorio, sono presenti conci in buone condizioni di conservazione.

Analisi comparata dei risultati derivanti dalla tecnica ultrasonica e termografica

Nel caso in esame, dall’osservazione della distribuzione delle temperature sulla superficie analizzata e tenendo conto anche della distribuzione della velocità ultrasonica, è possibile acquisire informazioni sullo stato di conservazione dei lapidei che costituiscono la struttura investigata. L’analisi comparata della mappa ultrasonica (Figura 3.36 a) con il termogramma (Figura 3.36 b), mette in evidenza delle interessanti analogie.

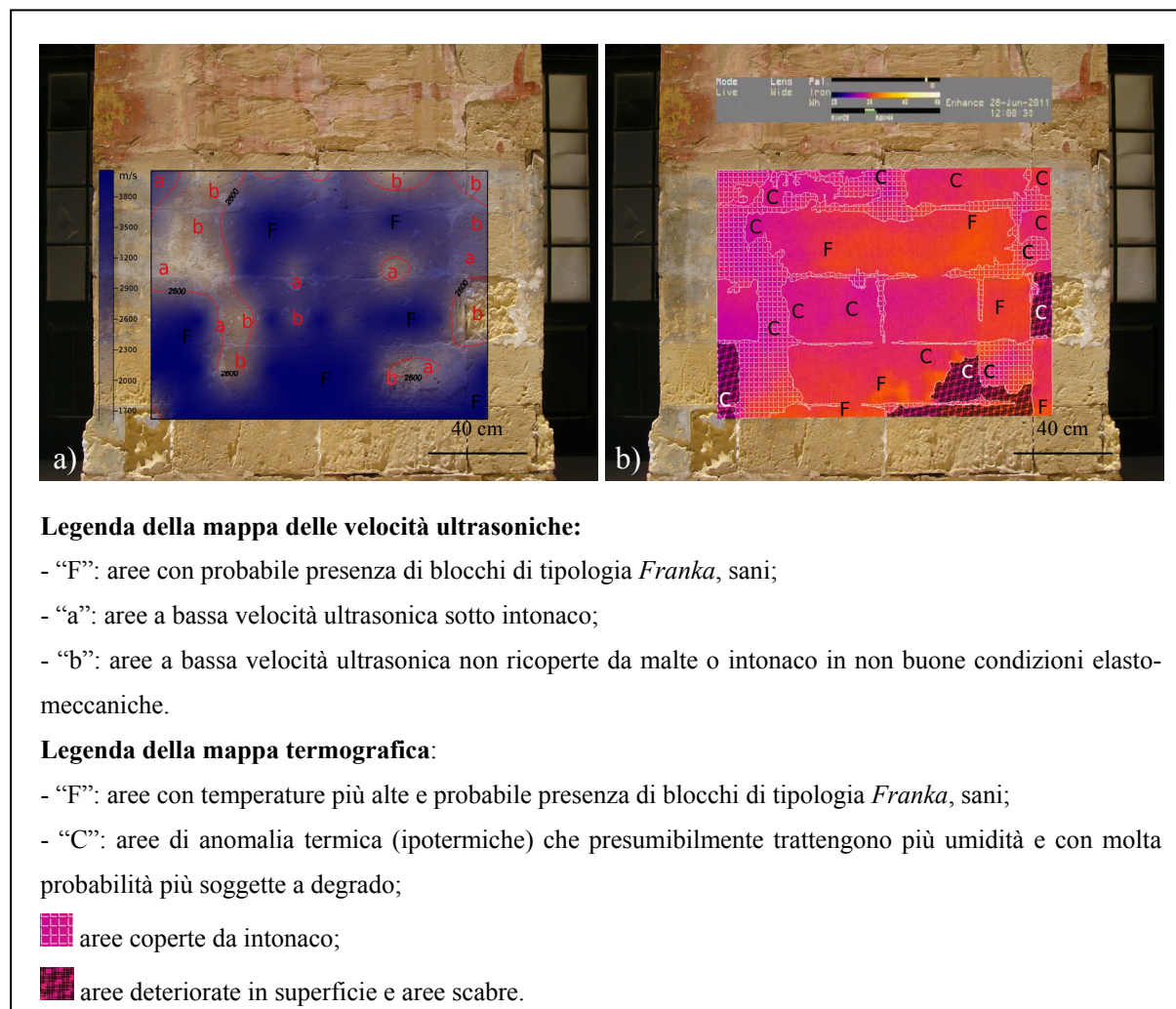


Figura 3.36: Mappa delle velocità ultrasoniche (a) confrontata con il termogramma (b).

Le zone dove, in base all'analisi ultrasonica, si presuppone siano presenti conci (della tipologia *Franka*) in buone condizioni elastiche, corrispondono alle zone dove sono state rilevate le temperature più alte.

Le zone caratterizzate da bassi valori di temperatura trovano interessanti corrispondenze con le zone a bassa velocità ultrasonica. Queste ultime possono essere determinate sia da possibili vuoti creatisi sotto lo strato di intonaco (in alcune zone è evidente come l'intonaco, pur essendo concepito come affine alla litologia, non abbia resistito al sottostante decadimento del materiale, staccandosi e rendendo evidenti delle zone di disgregazione), sia da scarse caratteristiche elastiche del materiale sottostante. I bassi valori di temperatura denotano un più o meno avanzato stato di degrado, presentando tipiche modalità di deterioramento del materiale, precedentemente descritte e visualizzate nella figura 3.4 (Paragrafo 3.1.1). A titolo esemplificativo, in figura 3.37 (a) si mostra il degrado di tipo pre-alveolare, nelle immagini 3.37 (b e c) si può vedere come le alterazioni influenzino sia le velocità della mappa ultrasonica, sia la distribuzione delle temperature nel termogramma.

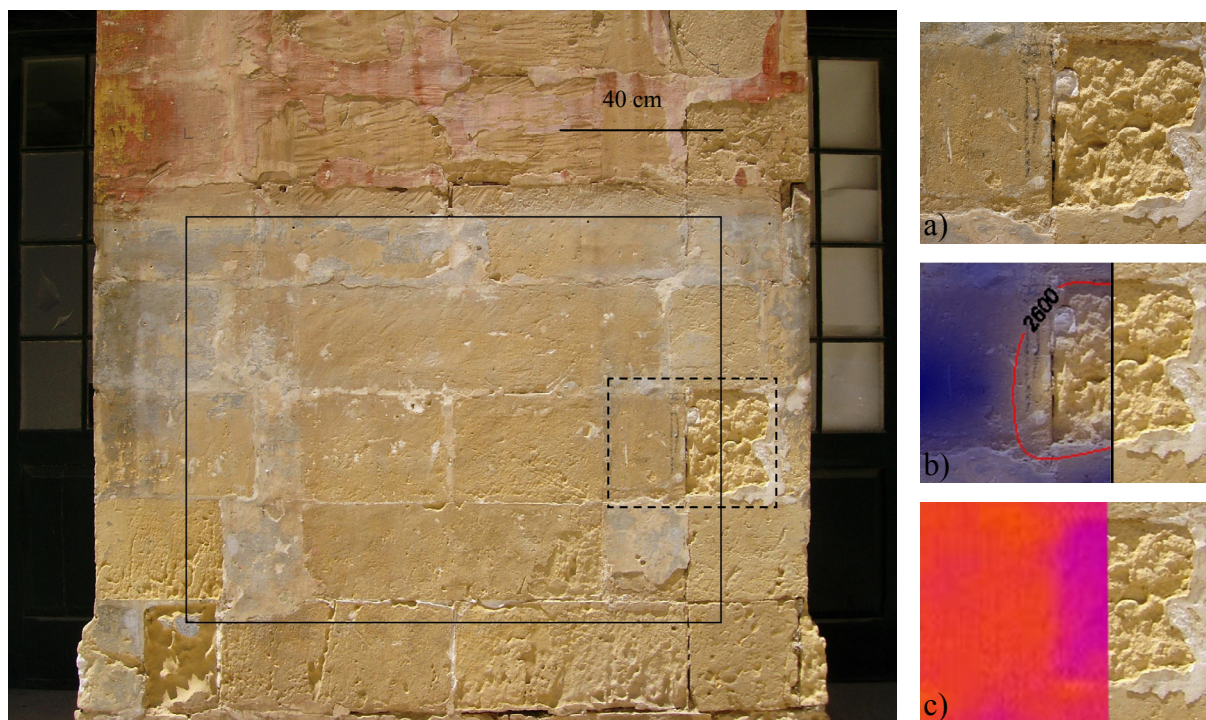


Figura 3.37: Particolare di una zona di alterazione pre-alveolare nell'area indagata, (a) particolare dell'immagine digitale; (b) particolare della mappa ultrasonica; (c) particolare del termogramma.

3.3.3 Attuale sede universitaria di Msida

Al fine di incrementare le esperienze nell'analisi diagnostica anche di strutture attuali, sono state effettuate, in modo integrato, indagini ultrasoniche e termografiche anche in una struttura muraria della sede universitaria di Msida. Su tale struttura, sono state investigate due porzioni del paramento esterno che fanno parte dei laboratori della “*Faculty for the Built Environment*”.

Analisi ultrasoniche

Per le misure ultrasoniche è stato utilizzato lo strumento P.U.N.D.I.T., operando con le stesse modalità utilizzate per le analisi effettuate nella sede universitaria di Valletta.

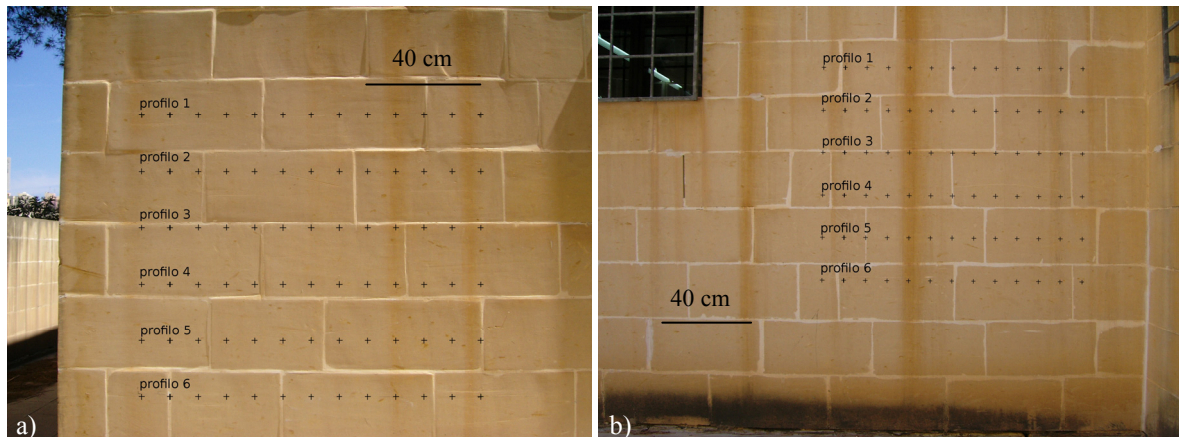


Figura 3.38: Strutture murarie dei laboratori della “*Faculty for the Built Environment*” a Msida; (a) geometria di acquisizione del primo settore investigato, (b) geometria di acquisizione del secondo settore investigato.

Per queste misure, nelle due porzioni di paramento investigate, sono stati realizzati 6 profili orizzontali distanziati di 20 cm l'uno dall'altro e su ogni profilo sono stati individuati 13 punti di misura (Figura 3.38). L'analisi è stata eseguita utilizzando trasduttori da 54 kHz. Anche in questo caso, come materiale di accoppiamento è stato usato un gel per ultrasuoni idrosolubile e atossico.

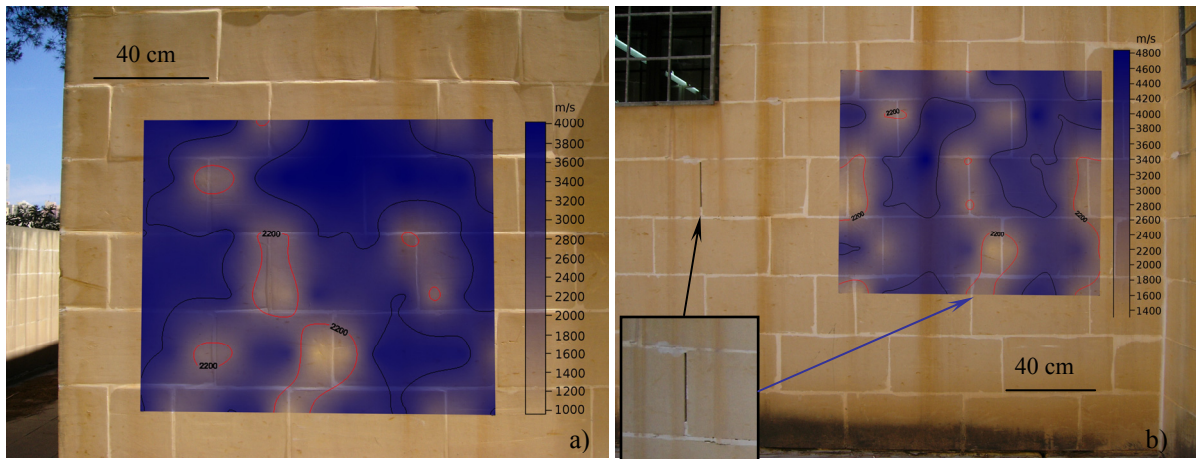


Figura 3.39: (a) mappa delle velocità ultrasoniche del primo settore investigato; (b) mappa delle velocità ultrasoniche del secondo settore investigato; le zone a bassa velocità sono delimitate dalla isolinea rossa, nel particolare un vuoto evidente in un giunto.

Il muro è composto da blocchi di *Globigerina Limestone* allettati con poca malta, le fughe tra i blocchi sono state stuccate con una malta affine alla litologia.

Come si può notare nelle mappe ultrasoniche illustrate in figura 3.39, il paramento esterno della struttura muraria è in buone condizioni nei due settori investigati (Figura 3.39 a e b) e non presenta segni di degrado. Infatti, l'analisi ultrasonica, sulla base dei valori di velocità degli impulsi ultrasonici longitudinali e dal confronto con le analisi ultrasoniche di laboratorio, ha consentito di verificare il buono stato delle condizioni elasto-meccaniche dei materiali. Le sole zone a bassa velocità ultrasonica (velocità inferiori a 2200 m/s), sono localizzate nei giunti dei blocchi di *Globigerina Limestone*, dove probabilmente, sotto il sottile strato di stucco utilizzato per coprire le fughe, ci sono dei vuoti nel materiale di allettamento, dovuti alla normale tecnica di costruzione. A tale proposito, si può osservare il particolare nella figura 3.39 b, dove si nota una zona dove lo stucco si è staccato lasciando scoperto un vuoto.

La distribuzione delle velocità ultrasoniche, nell'ambito dei singoli blocchi, non mette in evidenza anomalie di velocità. Pertanto in questo caso, si può affermare che le condizioni elastiche delle parti interne dei materiali costituenti la muratura non presentano disomogeneità denotando un buono stato di conservazione.

Analisi termografiche

L'analisi termografica è stata effettuata per individuare l'eventuale presenza di umidità e eventuali correlazioni con le mappe di velocità ultrasonica. Per l'acquisizione dei dati si è utilizzata la stessa strumentazione e le stesse modalità operative già utilizzate per le misure

sulle strutture dell'antica sede universitaria di Valletta. Questa analisi è stata realizzata nella porzione di paramento esterno già investigata con il metodo ultrasonico e illustrata nella figura 3.39 b. Sono stati effettuati diversi *shot* mentre la superficie era in fase di riscaldamento.

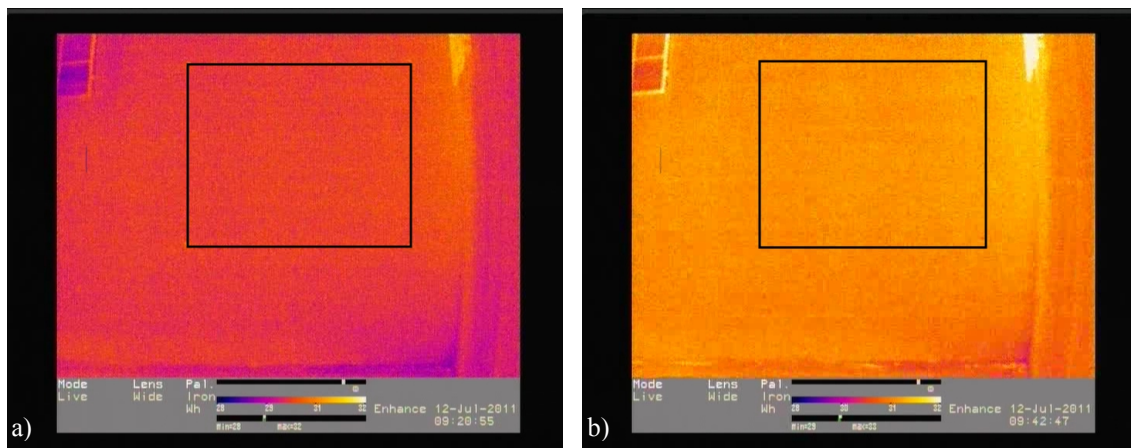


Figura 3.40: Termogrammi di una porzione di paramento esterno dei laboratori della “Faculty for the Built Environment”, in fase di riscaldamento, (a) *shot* effettuato alle 9.20; (b) *shot* delle 9.42 (le aree nei riquadri sono quelle dove sono state effettuate le analisi ad ultrasuoni).

Osservando i termogrammi illustrati in figura 3.40 (a e b), ottenuti dagli *shot* eseguiti in fase di riscaldamento, possiamo osservare che l'emissione termica è uniforme in tutte le aree del paramento e rimane costante nel tempo. Da tali osservazioni, si deduce che i materiali sono omogenei e non deteriorati. Inoltre, non si rileva la presenza di umidità.

Anche la termografia conferma, quindi, lo stato generale di buona conservazione della porzione di struttura muraria in esame, già constatato con il metodo ultrasonico.

Si noti come in questo caso non siano presenti analogie tra la distribuzione delle velocità ultrasoniche (Figura 3.39 b) e la distribuzione delle temperature nei termogrammi. In questo caso, la muratura investigata è composta, come già detto, da blocchi allettati con poca malta che lascia molti vuoti, le fughe presenti tra blocco e blocco sono coperte da un sottile strato di stucco che evidentemente è affine alla litologia stessa dei blocchi. Per cui, l'impulso ultrasonico, che riesce a penetrare sotto lo strato superficiale del paramento, è influenzato anche dai vuoti che ci sono sotto il sottile strato di stucco delle fughe, conseguentemente nelle mappe di velocità ultrasonica si osservano velocità ridotte nelle zone di giunzione dei blocchi. Invece, con la termografia si ottiene un esame dello strato superficiale dell'oggetto, quindi in questo caso, le fughe coperte con uno stucco che ha la stessa composizione dei blocchi, hanno

la stessa emissività dei blocchi stessi e il termogramma risulta omogeneo nella distribuzione delle temperature.

SINTESI DEI RISULTATI

La caratterizzazione in laboratorio dei *Calcari di Cagliari* e del *Globigerina Limestone* di Malta è stata effettuata mediante applicazione integrata delle tecniche ultrasoniche, coadiuvate dalle analisi di tipo minero-petrografico e dallo studio di alcune importanti proprietà fisiche come la densità, la porosità e l'assorbimento d'acqua. Le conoscenze sui materiali, ottenute nel corso delle analisi sperimentali effettuate in laboratorio, hanno fornito un importante contributo durante le fasi di progettazione dei rilievi in situ e di interpretazione dei dati ultrasonici e termografici.

Calcari di Cagliari

Le analisi di laboratorio effettuate sulla formazione dei *Calcari di Cagliari*, sono state focalizzate sulla caratterizzazione minero-petrografica ed elastica dei tre litotipi principali che rappresentano tale formazione: la *Pietra Forte*, il *Tramezzario* e la *Pietra Cantone*.

Per meglio interpretare i fattori che influenzano la propagazione del segnale ultrasonico nei materiali analizzati, si sono studiate le caratteristiche minero-petrografiche e tessiturali in laboratorio mediante misure calcimetriche, analisi diffrattometriche, analisi in microscopia ottica e analisi delle principali caratteristiche fisiche quali densità, porosità e assorbimento d'acqua. Dalle analisi calcimetriche effettuate è emerso che la *Pietra Forte* e il *Tramezzario* sono costituiti prevalentemente da carbonati, con valori superiori al 94,3% per la *Pietra Forte* e superiori all'86,5% per il *Tramezzario*, mentre la *Pietra Cantone* rappresenta una roccia carbonatica meno pura in quanto contiene una percentuale media in carbonati dell'80,4%. Infatti, mediante le analisi diffrattometriche in tale litotipo sono state rilevate, talvolta, altre specie mineralogiche (muscovite) oltre la calcite, che peraltro, rappresenta l'unica specie mineralogica osservata nei campioni degli altri due litotipi.

Le caratteristiche tessiturali dei tre litotipi sono state analizzate mediante l'osservazione delle sezioni sottili al microscopio ottico, da tali osservazioni si è constatato che i campioni di *Pietra Forte* hanno una tessitura grano-sostenuta, con grani di forma sub-angolare legati da un cemento spatico. La mesoporosità è in media dell'1%, del tipo "da vacui strutturali" e "da condotti". Secondo la classificazione di Folk (1959) i campioni di tale litotipo sono classificabili come biospariti, mentre secondo Dunham (1962), possono essere considerati *packstone*. I campioni di *Tramezzario*, classificabili come biomicriti (Folk, 1959) o *wackestone* (Dunham, 1962), hanno una tessitura matrice-sostenuta e grani di forma sub-arrotondata. La mesoporosità è in media del 2,5% e del tipo "da vacui riparati". I campioni di

Pietra Cantone, sono micriti fossilifere (Folk, 1959) o *mudstone* (Dunham, 1962), con una tessitura matrice-sostenuta e grani di forma arrotondata. La mesoporosità è in media del 5,5% e del tipo “da finestre”. Nonostante le caratteristiche tessiturali dei tre litotipi siano differenti, i valori di densità assoluta media, misurati mediante picnometro a elio, risultano essere molto simili (circa $2,70 \text{ g/cm}^3$) per tutti i campioni.

La porosità totale, calcolata per via dinamica, utilizzando la formula di Wyllie (1956), si discosta dai valori rilevati mediante osservazione al microscopio ottico in quanto non influenzata dalla dimensione dei pori. I campioni di *Pietra Forte* possiedono una porosità dinamica dello 0,1%, i campioni di *Tramezzario* del 7,9% e i campioni di *Pietra Cantone* del 47,3%. Anche l’assorbimento d’acqua, strettamente legato alla porosità dei campioni, ha messo in evidenza le differenze tessiturali tra i tre litotipi in studio. I campioni di *Pietra Forte* hanno assorbito lo 0,39% di acqua, quelli di *Tramezzario* il 5,77% e quelli di *Pietra Cantone*, con una percentuale di assorbimento del 7,75%, si dimostrano appartenenti alla litologia che tende a trattenere maggiormente l’umidità che favorisce il degrado dei materiali costruttivi.

Per caratterizzare le tre tipologie di *Calcarea di Cagliari* dal punto di vista elasto-dinamico e per ottenere dati utili alla caratterizzazione delle stesse litologie in sito, i campioni sono stati analizzati mediante misure ultrasoniche di laboratorio. Dalle analisi effettuate si è riscontrato che i risultati ottenuti mediante la tecnica di trasmissione diretta sono quelli più significativi, in quanto viene analizzato tutto il volume del campione. Nei campioni di *Pietra Forte*, sono state riscontrate velocità medie di 5930 m/s, di 4420 m/s nei campioni di *Tramezzario* e di 2580 m/s nei campioni di *Pietra Cantone*.

Alla luce dei risultati delle analisi ultrasoniche di laboratorio, integrate con le analisi minero-petrografiche, si è constatato che le velocità ultrasoniche sono più elevate nella *Pietra Forte* in quanto tale litotipo, a tessitura grano-sostenuta, è molto meno poroso e più compatto del *Tramezzario* e soprattutto della *Pietra Cantone*. Questi ultimi litotipi, infatti, sono caratterizzati da una tessitura fango-sostenuta.

Inoltre, dalle analisi calcimetriche effettuate in laboratorio si è riscontrato che, in generale, il *trend* delle velocità ultrasoniche presenta un incremento anche in funzione del contenuto in carbonati nei campioni.

Si può affermare, quindi, che le caratteristiche intrinseche di ciascun litotipo studiato influenzano, in maniera differente, la propagazione degli impulsi ultrasonici longitudinali.

I risultati ottenuti con le analisi di laboratorio hanno fornito un efficace contributo sia in fase di acquisizione, sia di interpretazione durante la successiva fase di applicazione delle tecniche

ultrasoniche sui materiali costruttivi delle opere monumentali dell'Exma' e della Torre di San Pancrazio.

Per effettuare l'analisi delle caratteristiche elastiche dei materiali costitutivi delle strutture monumentali oggetto di investigazione, sono state effettuate numerose indagini ultrasoniche, calibrate con analisi calcimetriche e diffrattometriche di micro campioni prelevati in sito. Queste analisi hanno fornito utili informazioni sulla natura dei materiali costituenti i paramenti esterni e degli intonaci dell'Exma'. Per cui, è stato possibile verificare la presenza di blocchi di *Calcarea di Cagliari* al di sotto degli intonaci e stabilire la composizione mineralogica dei campioni di intonaco, che è risultata di natura completamente diversa rispetto alle rocce carbonatiche costituenti le strutture murarie. È stato stabilito che tali intonaci sono stati ottenuti miscelando una componente carbonatica (calcite), con quantità più o meno elevate di quarzo. Minerali accessori presenti sono i k-feldspati e i plagioclasti, con tracce di muscovite o illite.

Lo studio comparato delle analisi calcimetriche e diffrattometriche con i valori di velocità ultrasonica determinati in laboratorio sui campioni delle varie tipologie di calcare in studio, hanno fornito un importante contributo nell'interpretazione delle mappe di distribuzione delle velocità ultrasoniche nei materiali costituenti le strutture investigate. Nei paramenti esterni del corpo centrale dell'Exma', è stato possibile individuare ampi settori a bassa velocità che denotano, sotto l'intonaco, la probabile presenza di conci di *Pietra Cantone* fortemente degradata. Inoltre, si sono potute analizzare sia l'evoluzione delle forme di degrado, sia l'efficacia delle opere di restauro pregresse, mediante un monitoraggio ultrasonico nel tempo. Dal confronto delle mappe relative ai dati acquisiti in un intervallo temporale di sei anni, si è potuto notare come le aree a bassa velocità ultrasonica si siano considerevolmente estese nel tempo, denotando un progressivo stato di degrado dei materiali costruttivi. Inoltre, è stato possibile individuare la natura litologica dei materiali e definire la tessitura muraria di un pilastro del porticato antistante la struttura in esame. In questo caso, la muratura risulta essere composta da litotipi con velocità ultrasoniche tipiche del *Tramezzario* per il 72,9% e della *Pietra Forte* per il 17,9%; mentre la parte restante è costituita da cemento e spazi vuoti.

Le analisi diagnostiche relative alla Torre di San Pancrazio sono state effettuate integrando le tecniche ultrasoniche con quelle termografiche per ottenere informazioni sullo stato di conservazione dei materiali superficiali, il cui riconoscimento macroscopico era difficilmente attuabile, trattandosi di materiali esposti agli agenti meteorici. Dall'analisi comparata dei termogrammi con le mappe ultrasoniche, si notano interessanti analogie tra la distribuzione delle temperature e delle velocità. La tecnica termografica, ha contribuito efficacemente a

differenziare i materiali costituenti i paramenti esterni della struttura investigata. Dallo studio integrato dei metodi non distruttivi con le analisi minero-petrografiche è emerso che la porzione di struttura investigata è composta da litotipi con velocità ultrasoniche tipiche della *Pietra Cantone* alterata per il 36,3%, del *Tramezzario* per il 32,4%, della *Pietra Forte* per il 27,4% e per la parte restante da cemento e spazi vuoti.

Globigerina Limestone di Malta

La metodologia utilizzata per l'analisi diagnostica delle rocce carbonatiche costituenti le strutture monumentali di Cagliari è stata applicata anche all'analisi delle strutture architettoniche di Malta. In questo contesto sono state effettuate numerose sperimentazioni in laboratorio e in sito, volte all'approfondimento delle tematiche inerenti la natura e le modalità di alterazione del *Globigerina Limestone* di Malta, che presenta molte similitudini con i *Calcari di Cagliari*. Pertanto, si è proceduto con la sperimentazione di laboratorio e con i test in sito, realizzati su strutture edificate con i succitati materiali, nelle città di Valletta e di Msida.

Le analisi di laboratorio sono state effettuate utilizzando la metodologia impiegata sui *Calcari di Cagliari*. Con le analisi calcimetriche si è riscontrato che i campioni del calcare *Franka*, sia del sottotipo *Bajda*, sia del sottotipo *Safra*, hanno rispettivamente un contenuto medio in carbonati del 99,5% e del 99,1%, superiore al contenuto medio misurato nei campioni della tipologia *Soll* (86,9%). Con le analisi diffrattometriche è stata osservata una composizione esclusivamente calcitica sia nei campioni di tipologia *Franka (Bajda e Safra)*, sia in quelli di tipologia *Soll*.

L'analisi mineralogica è stata perfezionata con l'osservazione delle sezioni sottili al microscopio ottico, al fine di analizzare le caratteristiche tessiturali dei due litotipi. Si è osservato che i campioni della tipologia *Franka Bajda* e *Franka Safra* hanno una tessitura grano-sostenuta con forma dei grani arrotondata, la porosità è del tipo intergranulare e intragranulare. Tali campioni sono stati classificati come biospariti (Folk, 1959) e come *packstone* (Dunham, 1962). I campioni della tipologia *Soll* hanno una tessitura matrice-sostenuta con forma dei grani sub-arrotondata e porosità di tipo intergranulare. Tali campioni sono stati classificati come biomicriti (Folk, 1959) e come *wackestone* (Dunham, 1962). Le differenze tessiturali dei due litotipi non sono conformi con i valori di densità assoluta media che risultano simili per entrambe le tipologie (circa 2,71 g/cm³).

Come per i *Calcari di Cagliari*, anche per i campioni di *Globigerina Limestone*, la porosità è stata calcolata per via dinamica utilizzando la formula di Wyllie (1956); nei campioni della

tipologia *Soll* è stata calcolata una porosità del 47%, mentre nei campioni della tipologia *Franka Bajda* e *Franka Safra* è stata calcolata una porosità del 44%. Tali valori di porosità, non sono concordanti con i valori di assorbimento d'acqua ottenuti per immersione. Infatti, si è osservato che i campioni della tipologia *Soll* assorbono meno acqua (11,84%) rispetto ai campioni delle tipologie *Franka Safra* e *Bajda* (rispettivamente 14,99% e 16,22%). Il minore assorbimento d'acqua dei campioni di *Soll* è dovuto al tipo di tessitura matrice-sostenuta, caratterizzata da una porosità di tipo chiuso.

La distinzione delle tipologie di *Globigerina Limestone*, dedotta mediante le analisi minero-petrografiche e fisiche, è stata evidenziata anche dal punto di vista elastico, mediante misure ultrasoniche di laboratorio. Dalle misure ultrasoniche, effettuate in trasmissione diretta, sono stati ottenuti valori di velocità medi di 2870 m/s nei campioni della tipologia *Franka Bajda*, di 2840 m/s nei campioni della tipologia *Franka Safra* e di 2546 m/s nei campioni della tipologia *Soll*. La velocità ultrasonica è sempre più elevata nei campioni di calcare della tipologia *Franka*, senza alcuna eccezione. È stato accertato, invece, che non ci sono differenze sostanziali nelle velocità ultrasoniche tra i campioni delle tipologie *Franka Bajda* e *Franka Safra*.

Si è osservato che il trend delle velocità ultrasoniche presenta, in generale, un incremento in funzione del contenuto in carbonati nei campioni e una diminuzione in funzione della quantità di micrite. La diminuzione di velocità, in questo caso, è correlata alla quantità di micro-pori (raggio < 10 μm), che è molto più abbondante nella tipologia *Soll* (il 48,95% dei pori del *Soll* ha raggio compreso tra 0,1 e 0,6 μm), rispetto a quella *Franka* che ha solo il 13,22% dei pori in questo intervallo di grandezza (Muscat, 2006; Cassar *et alii*, 2008).

Quanto appurato nel corso di questo studio, trova riscontro in letteratura (e.g. Anselmetti *et alii*, 1993). Tale studio indica che la microporosità tipica delle rocce carbonatiche con maggiore quantità di micrite (come la tipologia *Soll*) rispecchia una scarsità di cementazione che determina una tessitura matrice-sostenuta (e quindi con granuli non a contatto), che conduce ad un decremento delle velocità ultrasoniche. Inoltre, la tipologia *Soll* è caratterizzata da una porosità esclusivamente intergranulare, mentre la tipologia *Franka* ha sia una porosità di tipo intergranulare, sia di tipo intragranulare (Cassar, 2002). A parità di percentuale di porosità, nelle rocce carbonatiche con porosità di tipo esclusivamente intergranulare, si possono misurare velocità ultrasoniche fino al 50% inferiori rispetto alle rocce con altri tipi di porosità. La porosità di tipo intragranulare caratterizza invece, rocce dove si riscontrano velocità ultrasoniche più elevate rispetto a quelle con sola porosità intergranulare (Anselmetti *et alii*, 1993).

Per meglio comprendere il comportamento del segnale ultrasonico in casi complessi come quelli in argomento, si è ritenuto opportuno integrare le indagini ultrasoniche con quelle termografiche. Peraltro, con tali analisi si è anche voluto verificare se la tecnica termografica possa essere utilizzata come tecnica di verifica oggettiva dei meccanismi di assorbimento per capillarità dell'acqua, nei litotipi costituiti da tessiture differenti. La differenza rilevata in laboratorio anche con le misure termografiche (come nel caso dell'assorbimento d'acqua per immersione) è sempre riconducibile alle caratteristiche tessiture dei campioni. Infatti, i campioni della tipologia *Soll*, che possiedono una tessitura di tipo matrice-sostenuta e una porosità chiusa, presentano una certa resistenza alla risalita capillare, mentre nei campioni di *Franka* (sia *Safra*, sia *Bajda*), che possiedono una tessitura grano sostenuta e porosità aperta, la risalita capillare risulta più elevata.

Le analisi di diversa natura, effettuate in laboratorio su questi materiali, sono risultate di fondamentale importanza nell'interpretazione dei dati acquisiti in sito e ai fini della comprensione dei processi che innescano il degrado dei materiali in opera.

Le analisi in sito hanno interessato alcuni elementi strutturali di due importanti strutture maltesi, edificate con l'utilizzo del *Globigerina Limestone*: l'antica sede universitaria ed ex Collegio dei Gesuiti a Valletta e la *Faculty for the Built Environment*, struttura che fa parte del Campus Universitario di Msida. Con queste sperimentazioni si è voluto effettuare un confronto dello stato di conservazione di due strutture di diversa età, una edificata nel 1595 (quindi di interesse storico-monumentale) e una attuale, allo scopo di verificarne l'efficacia in due contesti differenti, anche se caratterizzati da materiali costruttivi della stessa natura.

Con le analisi ultrasoniche effettuate nella porzione di struttura dell'ex Collegio dei Gesuiti di Valletta, è stato possibile individuare diverse zone a bassa velocità (inferiori a 2600 m/s) che denotano scarse caratteristiche elastiche, correlabili con zone alterate e zone di non perfetta aderenza dell'intonaco al materiale sottostante. In particolare, le analisi termografiche, effettuate sulle stesse aree indagate mediante la tecnica ultrasonica, hanno permesso di mettere in relazione la diminuzione delle velocità ultrasoniche con le zone di ipotermia. Queste zone a bassa temperatura indicano caratteristiche elastiche dei materiali costruttivi non ottimali, a causa della presenza di umidità. Invece, le zone a temperatura più elevata, anche in base all'analisi comparata con i risultati dei dati di laboratorio, indicano materiali in buone condizioni di conservazione.

Le analisi diagnostiche ultrasoniche e termografiche, effettuate in una porzione della struttura muraria della *Faculty for the Built Environment*, confrontate con i dati ottenuti in laboratorio, hanno consentito di verificare le buone condizioni elastiche dei materiali costruttivi. Le

uniche zone a bassa velocità ultrasonica (inferiori a 2200 m/s), sono state individuate nei giunti dei blocchi di *Globigerina Limestone*. In questo caso, molto probabilmente, sussistono dei vuoti nel materiale di allettamento presente sotto il sottile strato di stucco che è stato adoperato per rivestire le fughe tra i conci. Non si sono riscontrate, invece, anomalie di velocità ultrasonica all'interno dei singoli blocchi. Anche le analisi termografiche, effettuate negli stessi settori di struttura muraria, hanno confermato che i materiali costituenti sono omogenei e non deteriorati; infatti, si è potuto osservare che l'emissione termica è uniforme in tutte le aree del paramento ed è rimasta costante nell'intervallo di tempo considerato.

Anche in questo caso, come nelle analisi effettuate sui *Calcari di Cagliari*, l'approccio integrato tra le tecniche ultrasoniche e termografiche ha dimostrato di migliorare sensibilmente l'analisi diagnostica sullo stato di conservazione dei materiali e sulla valutazione della loro durabilità.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Obiettivo principale della ricerca è stato quello di valutare l'efficacia delle metodologie di tipo acustico, in particolare ultrasonico, integrate con dati minero-petrografici, nella diagnosi dei materiali carbonatici diffusamente impiegati nella costruzione di strutture monumentali del Bacino Mediterraneo.

In alcuni dei casi trattati, l'analisi diagnostica è stata coadiuvata dall'analisi termografica. Per conseguire l'obiettivo sopra citato, la ricerca si è sviluppata mediante una fase preliminare di analisi dello stato dell'arte sulle applicazioni delle tecniche acustiche, nella diagnostica dei materiali lapidei di natura carbonatica e in una successiva fase sperimentale che ha contemplato sia misure di laboratorio, sia misure in situ su due strutture monumentali del Centro Storico di Cagliari e su altrettante strutture di Malta. Preliminarmente alle prove in situ, sono state condotte accurate analisi di laboratorio sui materiali oggetto di indagine (*Calcari di Cagliari e Globigerina Limestone* di Malta).

Mediante l'applicazione integrata delle tecniche non distruttive e minero-petrografiche è stato possibile individuare le caratteristiche tessiturali e composizionali che predispongono i litotipi studiati al degrado. Lo studio in sezione sottile per il riconoscimento della morfologia, disposizione e quantità di pori e per la valutazione del contenuto in matrice, ha permesso di comprendere i meccanismi che influenzano la variazione delle velocità ultrasoniche nei litotipi sia in laboratorio, sia in situ. Ciò è risultato di fondamentale importanza non solo per l'esecuzione di una corretta diagnosi dei materiali, ma anche per evidenziare le differenze esistenti tra le due litologie studiate (*Calcari di Cagliari e Globigerina Limestone*). Un dato importante che è stato accertato è che tali litologie sono simili per quanto riguarda la composizione mineralogica, ma sono caratterizzate da importanti differenze nelle caratteristiche tessiturali che influenzano fortemente non solo la trasmissione degli impulsi ultrasonici ma anche il tipo di degrado che interessa i materiali in opera. Infatti, è stato verificato che nei *Calcari di Cagliari* sono principalmente la percentuale totale di porosità e subordinatamente la tessitura ad influenzare la velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici e il degrado dei materiali in opera. Nel *Globigerina Limestone* di Malta sono la tessitura e la dimensione dei pori che condizionano principalmente la trasmissione degli impulsi ultrasonici e influenzano il degrado dei materiali.

Il supporto delle analisi minero-petrografiche è risultato di importanza fondamentale anche nella calibrazione del dato ultrasonico in situ. Infatti le analisi di laboratorio su micro campioni acquisiti nei materiali in opera, hanno fornito informazioni su alcune caratteristiche

composizionali e strutturali dei materiali, consentendo di calibrare i dati acquisiti con le tecniche non distruttive. Tale calibrazione, possibile nei settori di struttura muraria affiorante, ha consentito di ricostruire la tessitura muraria anche al di sotto degli intonaci, partendo dai soli dati di velocità ultrasonica. L'analisi comparata delle mappe di velocità e di quelle termografiche con i dati di laboratorio, ha portato ad identificare i settori a più alto rischio di degrado nell'ambito delle strutture investigate. La presenza di zone caratterizzate da basse velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici anche in corrispondenza di interventi di restauro già eseguiti, ha messo in evidenza la scarsa efficacia di tali interventi, realizzati evidentemente senza un'adeguata base di conoscenze e con materiali scarsamente compatibili con quelli originari.

La metodologia proposta, mediante approccio integrato minero-petrografico-acustico, si è rivelata di grande efficacia anche nel monitoraggio nel tempo dello stato di conservazione delle strutture. Pertanto, tale metodologia, oltre ad avere un elevato potere risolutivo nella diagnostica dei materiali costruttivi, presenta il vantaggio della sua riproducibilità nel tempo. Infine, l'impiego dell'approccio integrato utilizzato in questo studio, presenta alcuni aspetti di sicuro interesse pratico per i tecnici che operano nel settore dei Beni Culturali per quanto riguarda la diagnostica, la guida ai ripristini e la verifica dell'efficacia degli interventi conservativi.

Ringraziamenti

Occorrerebbe un elenco molto più lungo di questo per poter ringraziare tutte le persone che secondo me hanno realmente contribuito, per diversi motivi, alla realizzazione di questo lavoro. In questo contesto mi devo affidare alla memoria, non c'è un ordine di importanza nella lista delle persone che illustrerò.

Voglio ringraziare prima di tutto Sara, la sua e la mia famiglia e tutti i miei amici, per il sostegno che mi hanno dato, soprattutto nei momenti difficili che non sono stati pochi in questi tre anni.

Ringrazio la Professoressa Silvana Fais e la Professoressa Concetta Ferrara, per avere fornito un contributo fondamentale per il miglioramento e la riuscita di questo lavoro. Ringrazio il Dottor Francesco Cuccuru per il suo amichevole aiuto; il Dottor Stefano Columbu per la collaborazione fornita; il Professor Felice Di Gregorio e il Dott. Giuseppe Piras per aver messo a disposizione la termocamera utilizzata per le analisi effettuate a Cagliari; il Professor Franco Frau per aver permesso l'accesso alla strumentazione XRD; la Dott.ssa Paola Ligas; la Dott.ssa Sara Concas e Salvatore Noli. Ringrazio Tesfaye e Asmelash, semplicemente per la loro amicizia. Inoltre voglio ringraziare anche la Signora Monica Rombi.

La parte della ricerca sviluppata sui calcari maltesi è parte integrante dei lavori eseguiti nell'ambito dell'accordo di collaborazione internazionale organizzato con l'Università di Malta. Per questa esperienza, molto importante per me dal punto di vista scientifico ma anche umano, voglio ringraziare la Professoressa JoAnn Cassar (Head of Department of Built Heritage and M.Sc. Course Coordinator, Faculty for the Built Environment) per il suo coordinamento del lavoro di ricerca svolto a Malta, per i suoi fondamentali consigli e l'illimitata fiducia accordatami; il Dott. Ing. John Charles Betts (Dean of the Faculty of Engineering, Head of Department of Metallurgy & Materials Engineering) per la sua grande disponibilità e simpatia, per avere messo a disposizione la termocamera e fornito importanti informazioni sul funzionamento dello strumento; ringrazio anche l'Arch. Gaetano Zammit per la sua gentile collaborazione e per avere messo a disposizione tutti i numerosi campioni, oggetto fondamentale di questo studio. Ringrazio il Dottor Reuben Grima (Lecturer, Department of Built Heritage, Faculty for the Built Environment) per la sua attiva collaborazione nelle attività di analisi in sito e per il suo costante sostegno, offertomi da subito anche in ogni altra attività. Ringrazio il Professor Alex Torpiano (Dean of the Faculty for the Built Environment, Head of Department of Civil Structural Engineering) per le

autorizzazioni fornite per poter effettuare le analisi in strutture appartenenti all'Università. Ringrazio la Signora Lucienne Bugeja (Office of the Secretary, Rectorate) per la sua collaborazione durante i lavori svolti nella sede del campus di Valletta. Infine, ma non in ordine di importanza, ringrazio tutto lo staff del Dipartimento di "Built Heritage", Roberta De Angelis, Dr. Claude A. Busuttil, Shirley Cefai, David Galea e i tecnici di laboratorio per la loro costante collaborazione.

Bibliografia

- ADAMS A.E., MACKENZIE W.S., GUILFORD G. (1988) - Atlante delle rocce sedimentarie al microscopio. Ed. Zanichelli, Bologna.
- AMERICAN SOCIETY FOR NON DESTRUCTIVE TESTING (ASNT) (1975) - SNT-TC-1A: Personnel Qualification and Certification in Non-destructive Testing.
- ANSELMETTI, F.S., EBERLI G.P. (1993), - Controls on sonic velocity in carbonates, *Pure and Applied Geophysics* 141/2-4, 287-323.
- ASSORGIA A., BARCA S., SPANO C. (1997) - A synthesis on the Caenozoic stratigraphic, tectonic and volcanic evolution in Sardinia (Italy); *Boll. Soc. Geol. It., Roma*; # 116, pp. 416-420.
- ATZENI, C., PIA, G., SANNA U. (2010) - I materiali dell'edilizia storica, storia, tecnologia, applicazioni. Aracne Editrice, Roma. 108-110.
- AVDELIDIS, N.P., MOROPOULOU, A. (2004) - Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *Journal of Cultural Heritage*, Volume 5, Issue 1, January-March 2004, Pages 119-127.
- AZZOPARDI, A.S.J. (2002). - Jesuit Schools in Malta. St Aloysius' College Publication, Malta. Volume I 1592-1907, Veritas Press, Zabbar, 19-35.
- BARCA S., ULZEGA A. (2005) - Note illustrative della carta geologica d'Italia. Dipartimento difesa del suolo, servizio geologico d'Italia. Pp 98-105.
- BARROCU G., CREPELLANI T. (1979) - Riferimenti bibliografici per la Carta geologico-tecnica dell'area di Stampace e quartiere Villanova di Cagliari.
- BARROCU G., CREPELLANI T., LOI A. (1979) - Caratteristiche geologico-tecniche dei terreni dell'area urbana di Cagliari. Università degli studi di Cagliari. Pp. 57.
- BASTIANINI, F. (2008) - Strumentazione. In: PASCALE, G. - Diagnostica a ultrasuoni per l'edilizia: costruzioni civili – beni culturali”, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 51-87.
- BOADU, F.K., LONG, T.L. (1996) - Effects of fractures on seismic-wave velocity and attenuation. *Geophys. J. Int.* 127, 86 – 110.
- BOADU, F.K. (1997) - Fractured rock mass characterization parameters and seismic properties: Analytical studies. *Journal of Applied Geophysics*, 36, 1-19.

- BODNAR, J.L., CANDORÉ, J.C., NICOLAS, J.L., SZATANIK, G., DETALLE, V., VALLET, J.M. (2012) - Stimulated infrared thermography applied to help restoring mural paintings. *NDT and E International* vol. 49 July, 2012. p. 40-46.
- BOSCO, A. (2009) - Lezione: “Le tecniche d'intervento sui materiali lapidei: riparazione”. <http://www.architettura.unina2.it/docenti/areaprivata/76/documenti/Lez%20lapidei%201.pdf>
- BOSELLINI A. (1991) - Introduzione allo studio delle rocce carbonatiche. I. Bovolenta editore s.r.l., Ferrara.
- BOSILJKOV, V., URANJEK, M., ZARNIC, R., BOKAN-BOSILJKOV, V. (2010) - An integrated diagnostic approach for the assessment of historic masonry structures. V. *Journal of Cultural Heritage* vol. 11 issue 3 July - September, 2010. p. 239-249.
- BRUNETTI, G. (2007) - Tecniche di indagine non distruttive e monitoraggio. <http://areeweb.polito.it/didattica/savbaa/uploads/docpubb/17/diagnostica.pdf>.
- BS 1881-204 (1988) - Testing concrete –Part 204: Recommendations on the use of electromagnetic covermeters.
- CACHIA, J. (1985) - The Mechanical and Physical Properties of the Globigerina Limestone as used in Local Masonry Construction. A. & C.E. dissertation, University of Malta.
- CARMIGNANI L., OGGIANO G., BARCA S., CONTI P., SALVADORI I., ELTRUDIS A., FUNEDDA A., PASCI S. (2001) - Geologia della Sardegna (Note illustrative della Carta Geologica della Sardegna in scala 1:200.000). Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia, 60, pp.283. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.
- CASSAR, J. (2002) - Deterioration of the Globigerina Limestone of the Maltese Islands. In: SIEGSMUND, S., WEISS, T. & VOLLBRECHT, A., Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies. Geological Society, London, Special Publications 2002, Vol. 205, 33–49.
- CASSAR, J. (2004) - Composition and property data of Malta's building stone for the construction of a database. In: PRIKRYL, R. & SIEGL, P., Architectural and Sculptural Stone in Cultural Landscape. Karolinium Press, Prague, 11–28.
- CASSAR, J. (2010) - The use of limestone in a historic context - the experience of Malta. Geological Society, London, Special Publications 2010, doi: 10.1144/SP331.2. Vol. 331, 13-25.
- CASSAR, J., MARROCCHI, A., SANTARELLI, M.L., MUSCAT, M. (2008) - Controlling crystallization damage by the use of salt inhibitors on Malta's limestone. In: *Materiales de*

Construcción. Vol. 58, No. 289/290, January - June 2008, Castiniera Libreria Tecnica, Spain, 281-293.

CASSAR, J., VELLA, A. J. (2003) - Methodology to identify badly weathering limestone using geochemistry: case study on the Lower Globigerina Limestone of the Maltese Islands. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 36, 85-96.

CEE (1993) - Direttiva n. 93/189.

CHERCHI A. (1971) - Appunti biostratigrafici sul Miocene della Sardegna (Italia), V congresso del Neogene mediterraneo, Lyon. Pubblicazioni dell'istituto di Geologia Paleontologia e Geografia fisica dell'Università di Cagliari. 18 pp.

CHERCHI, A. & MONTADERT, L. (1982) - The OligoMiocene rift of Sardinia and the early history of the western mediterranean basin. Nature 298, 736-739.

CHERCHI, A. & MONTADERT, L. (1984) - Il sistema di rifting oligo-miocenico del Mediterraneo occidentale e sue conseguenze paleogeografiche sul Terziario sardo. Mem. Soc. Geol. It. 24, 387-400.

CHRISTARAS, B. (1994) - Anisotropy effects on the elastic parameters of rocks; determination using ultrasonic techniques. 7o Intern. Congr. Geol. Soc. Gr., XXX. 4, pp. 381-387.

CHRISTARAS, B. (1997) - Estimation of damage at the surface of stones using non-destructive techniques, STREMAH 5 V, 5th International Congress of Structural Studies, Repairs and Maintenance of Historical Buildings in Advances in Architectural Series of Computational Mechanics Publications, San Sebastian, Spain, June 25-27, 1997, 121-128.

CHRISTARAS, B., AUGER, F., MOSSE, E. (1994) - Determination of the elastic moduli of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods to the direct static one. Materials & structures, 27, pp. 222-228. 30.

CHOQUETTE P.W., PRAY L.C. (1970) - Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin. Pp 207-250.

CNR-DT 200/2004 - Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati. Materiali, strutture in c.a. e in c.a.p., strutture murarie.

COMASCHI CARIA, I. (1958) - Macrofauna e stratigrafia del Miocene della zona di Cagliari, estratto dal bollettino della Società Geologica Italiana. Vol. LXXVII. 32 pp.

CONCU, G., FAIS, S. (2003) - In time analysis of a viscous coupling agent effect in ultrasonic measurements, 3rd international conference on non-destructive testing of the Hellenic society for NDT.

CORRIAS, A. (2010) - Condizioni di Laue per la diffrazione. <http://unica2.unica.it/~corrias/ANNA/Didattica/strutt-3.pdf>.

DEERE, D. U., MERRIT, A. H., COON, R. F. (1969) - Engineering classification of in situ rock. Tech. Rep. AFWL-TR-67-144, Airforce Weapons Lab., New Mexico.

DEERE, D. U., LIEN, R., LUNDE, J. (1974) - Engineering classification of rock masses for the design of tunnel supports. *Rock Mechanics*. Vol. 6. No. 4. pp.189-239.

DELLA MARMORA, A. (1860) - Itinerario nell'isola di Sardegna vol. I. Ilisso (1997).

D.M. 13/09/1999 - Gazzetta Ufficiale, serie generale n. 248 del 21-10-1999 (Determinazione gas-volumetrica della CO₂ che si svolge trattando un campione con acido cloridrico).

DIANA, G., FAIS, S. (2011) - IR thermography and ultrasonic investigations in the cultural heritage field (proceedings of the 15th international conference on cultural heritage and new technologies). Ed. Museen Der Stadt Wien – Stadtarchäologie - Mag. Karin Fischer Ausserer Obere Augartenstraße 26–28 A-1020 Wien. ISBN 978-3-200-02448-9.

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEI MATERIALI E DELLA PRODUZIONE. (2002) - Università Federico II di Napoli – Degradamento dei materiali. Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione.

DIRETTIVA DEL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI del 9 febbraio 2011 (Supplemento Ordinario n. 54 alla GURI n. 47 del 26 febbraio 2011) - Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008.

DUNHAM, R. J. (1962) - Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W. E. (ed.), *Classification of carbonate rocks: American Association of Petroleum Geologists Memoir*, p. 108-121.

DUSSIK, K. T. (1952) - Weitere Ergebnisse der Ultraschalluntersuchung bei Gehirnerkrankungen. In: *Acta Neurochirurgica*, Vol. 2, No 3-4 / September 1952, pp. 379-401, Springer, Wien, ISSN 0001-6268 (Print) 0942-0940 (Online).

EMBRY, A.F., KLOVAN, J.E. (1971) - A Late Devonian reef tract on North-eastern Banks Island, NWT: *Canadian Petroleum Geology Bulletin*, v. 19, p. 730-781.

FAIS, S., CASULA, G. (2010) - Application of acoustic techniques in the evaluation of heterogeneous building materials', *NDT & E International*, vol. 42, pp. 62-69.

- FAIS, S., TOCCO, R., CASULA, G. (1999) - ND acoustic techniques to assess the preservation of a church colonnade – a case history. 61st EAGE conference & technical exhibition, Helsinki, extended abstracts.
- FAIS, S., LIGAS, P., PALOMBA, M., TOCCO, R., (2002) - Evaluation of preservation of monumental buildings by ND acoustic techniques and mineralogical studies. Protection and conservation of the Cultural Heritage of the Mediterranean Cities, Galan and Zezza, Sweets & Zeitlinger, Lisse. Pp 307-314.
- FAIS S., LIGAS P., TOCCO R. (2005) - Acoustic techniques for the evaluation of the building materials of monumental structures. Geophysical Research Abstracts, European Geosciences Union General Assembly Vienna, Austria, 24–29 April 2005. p. 1–3.
- FAIS, S., CASULA, G. (2009), - Application of acoustic techniques in the evaluation of heterogeneous building materials-, NDT & E International, vol. 42, pp. 62-69.
- FERRARA C., DI GREGORIO F., MATTA P. (1998) - Primi risultati delle ricerche geoarcheologiche sui nuovi scavi della necropoli di Tuvixeddu. Tuvixeddu t. su t.; Sepolture dal V secolo d.C. in un nuovo settore della necropoli punico-romana. Ministero per i Beni Culturali e Ambientali, Soprintendenza Archeologica per le Province di Cagliari e Oristano. Pp 59-62.
- FITZNER, B. & HEINRICHS, K. (2002) - Damage diagnosis on stone monuments - weathering forms, damage categories and damage indices. In Prikryl, R. & Viles, H. A. (ed.): Understanding and managing stone decay, Proceeding of the International Conference "Stone weathering and atmospheric pollution network (SWAPNET 2001)", 11-56, Charles University in Prague, The Karolinum Press.
- FITZNER, B., HEINRICHS, K., LA BOUCHARDIERE, D. (2002) - Limestone weathering of historical monuments in Cairo, Egypt. Geological Society, London, Special Publications 2002, Vol. 205, 217-239. Doi: 10.1144/GSL.SP.2002.205.01.17.
- FITZNER, B., HEINRICHS, K., VOLKER, M. (1996) - Model for salt weathering at Maltese Globigerina Limestones. In: ZEZZA, F., Origin, Mechanisms and Effects of Salt on Degradation of Monuments in Marine and Continental Environments. Proceedings, European Commission Research Workshop on Protection and Conservation of the European Cultural Heritage, Bari, Italy. Research Report, 4, 333-344.
- FOLK, R.L. (1959) - Practical petrographic classification of limestones: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 43, p. 1-38.
- FOLK, R.L. (1980) - Petrology of Sedimentary Rocks: Austin, Texas, Hemphill.

- FOURMAINTRAUX, D. (1975) - Quantification des discontinuités des roches et des massifs rocheux. *Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique des Roches*. vol. 7 issue 2 June 1975. p. 83 – 100.
- GANDOLFI, R., PORCU, B. (1967) - Contributo alla conoscenza delle microfacies mioceniche delle Colline di Cagliari (Sardegna), *Rivista italiana di paleontologia e stratigrafia*, 73(01), pp. 313-348.
- GAVIGLIO, P. (1989) - Longitudinal waves propagation in a limestone: the relationship between velocity and density. *Rock Mech. Rock Eng.* 22, 299-306.
- GRAFF, K. F. (1982) - A History of Ultrasonics, in *Physical Acoustics, Volume XV*. Academic Press, New York.
- GRINZATO, E., BRESSAN, C., MARINETTI, S., BISON, G., BONACINA, C. (2002) - Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR thermography: Giotto at infrared. *Infrared Physics & Technology*, Volume 43, Issues 3-5, June 2002, Pages 165-169.
- GRINZATO, E., MARINETTI, S., BISON, P.G., CONCAS, M., FAIS, S. (2004) - Comparison of ultrasonic and IR thermography for the characterisation of stones. *Infrared Physics & Technology* 46 (2004). Science Direct, Elsevier, 63-68.
- GU n.151 del 2-7-1986 - L. 21 giugno 1986, n. 317. Procedura d'informazione nel settore delle norme e regolamentazioni tecniche e delle regole relative ai servizi della società dell'informazione in attuazione della direttiva 98/34/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 22 giugno 1998, modificata dalla direttiva 98/48/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 20 luglio 1998.
- HUDSON, T.A., JONES, E.T.W., NEW, B.M. (1980) - P-wave velocity measurements in a machine bored chalk tunnels. *Q. J. Eng. Geol.* 13, 33-43.
- JENSEN, J. - Determination of crack depth with PUNDIT. In: PUNDIT, manual for use of portable ultrasonic non-destructive digital indicating tester. CNS Electronics Ltd, London, 76p.
- KAHRAMAN, S. (2002) - The effects of fracture roughness on P-wave velocity. *Eng. Geology*, 63, 347-350.
- KOWALLIS, B.J., JONES, L.E.A., WANG, H.F. (1984) - Velocity – Porosity – Clay content systematics of poorly consolidated sandstones. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 89 (No. B12), 10,355-10,364.

- LEONE, F., HAMMAN, W., LASKE, R., SERPAGLI, E. AND VILLAS, E. (1991) - Lithostratigraphic units and biostratigraphy of the post-sardic Ordovician sequence in south-west Sardinia. *Boll. Soc. Paleont. Ital.* 30, 201-235.
- LEONE, F., PONTILLO, C., SPANO, C. (1992) - Benthic paleocommunities of the Middle-Upper Miocene lithostratigraphic Units from the Cagliari hills (Southern Sardinia, Italy). In: Volume dedicato a Tommaso Coccozza (L. Carmignani & F. P. Sassi Eds.). IGCP N. 276, News-letter, 5: 151-158 (1992).
- LEUCCI, G. (2004) - I metodi elettromagnetico impulsivo, elettrico e sismico tomografico a rifrazione per lo studio di problematiche ambientali: sviluppi metodologici e applicazioni. Tesi di Dottorato di Ricerca in Geofisica per l'Ambiente ed il Territorio (XV Ciclo) Università consorziate Lecce, Messina, Palermo.
- LIU, Z., RECTOR, J.W., NIHEI, K.T., TOMUTSA, L., MYER, L.R., NAKAGAWA, S. (2001) - Extensional wave attenuation and velocity in partially-saturated sand in the sonic frequency range. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- LONG, J.C.S., WITHERSPOON, P.A. (1985) - The relationship of the degree of interconnection to permeability in fracture networks. *J. Geophys. Res.* 90, pp. 3087-3098.
- MALTA-CANADA.COM
http://www.malta-canada.com/churches_chapels/Images/Malta/VallJesuits18thcent.jpg.
- MARTÍN-OCAÑA, S., CAÑAS-GUERRERO, I., GONZÁLEZ-REQUENA, I. (2004) - Thermographic survey of two rural buildings in Spain. *Energy and Buildings*, 36, pp. 515-523.
- MENDITTO, G., MENDITTO, S. (2008) - Indagini semidistruttive e non distruttive nell'ingegneria civile: disciplina tecnica, applicativa e normativa", Pitagora, Bologna.
- MEOLA, C. (2007) - Infrared thermography of masonry structures. *Infrared Physics & Technology*, Volume 49, Issue 3, January 2007, Pages 228-233.
- MEOLA, C., DI MAIO, R., ROBERTI, N., CARLOMAGNO, G.M. (2005) - Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures. *Engineering Failure Analysis*, Volume 12, Issue 6, December 2005, Pages 875-892.
- MICALLEF, A., BERNDT, C., DEBONO, G. (2011) - Fluid flow systems of the Malta Plateau, Central Mediterranean Sea. *Marine Geology* vol. 284 issue 1-4 June 1, 2011. p. 74-85.

MILANESIO, M. (2006) - Diffrazione da Materiali Policristallini I: Principi e Campi di Applicazione. In: Guagliardi, A., e Masciocchi, N. - Analisi di materiali policristallini mediante tecniche di diffrazione: atti della Scuola di Diffrazione da Materiali Policristallini, Martina Franca, Palazzo Ducale, 26-30 Giugno 2006. - Varese : Insubria University Press, 2007. - 218 p.

MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI, Decreto 9 gennaio 1996 (Suppl. Ord. G.U. 05/02/1996, n. 19). - Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche.

MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI, Decreto Ministeriale 14 Gennaio 2008; "Norme Tecniche per le Costruzioni" (NTC).

MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI, Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 - Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni".

MOHS, F. (1822) - Grundriß der Mineralogie (two volumes, 1822 and 1824): Dresden, Arnoldschen Buchhandlung.

MURRAY J. (1890) - The Maltese islands, with special reference to their geological structure. The Scottish Geographical Magazine, 6: 449-488.

MUSCAT, M. (2006) - The Behaviour of *Franka* and *Soll* Globigerina Limestone with respect to Salt Weathering and Possible Solutions, June 2006. (Unpublished undergraduate dissertation), Faculty of Architecture and Civil Engineering, University of Malta.

NARDINI, M. (2009) - Diffrazione di Raggi-X da Monocristalli. <http://users.unimi.it/biolstru/teaching/Diffrazione.pdf>.

NORMAL 22/86 (1987) - Misura in laboratorio e in sito della velocità apparente (o virtuale) di propagazione del suono (onde longitudinali) nei materiali porosi da costruzione. CNR, Roma.

OB-ULTRASOUND.NET - A summary of the early development of Ultrasonics prior to the 1950s leading to medical applications. http://www.ob-ultrasound.net/ultrasonics_history.html

ORDINANZA DEL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI, Testo integrato dell'Allegato 2 – Edifici – Ordinanza 3274 come modificato dall'OPCM 3431 del 3/5/05 - Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici.

PALA, A. & SIRIU, E. (1998) - Note illustrative alla carta idrogeologica di Cagliari. Rendiconti Seminario Facoltà Scienze dell'Università di Cagliari 68, 151-175.

PALOMBA, M. (2003) - Appunti sul seminario di Metodologie per la caratterizzazione chimico-fisica dei materiali (non pubblicato).

- PASCALE, G. (2008) - Diagnostica a ultrasuoni per l'edilizia: costruzioni civili – beni culturali”, Dario Flaccovio Editore, Palermo.
- PECORINI, G., POMESANO CHERCHI, A. (1969) - Ricerche geologiche e biostratigrafiche sul Campidano meridionale (Sardegna). Mem. Soc. Geol. It. 8, 421-451.
- PEDLEY, H.M. (1978) - A new lithostratigraphical and palaeoenvironmental interpretation for the Coralline Limestone formations (Miocene) of the Maltese islands. Overseas Geology and Mineral Resources, Institute of Geological Sciences, London, 54.
- PEDLEY, H.M., HUGHES CLARKE, M., GALEA, P. (2002) - Limestone Isles in a Crystal Sea. PEG Ltd, Malta.
- PORCO, G., ROMANO, D. (2005) - Valutazione dei livelli di efficienza statica sugli edifici in c.a.: Protocolli procedurali e tecniche di controllo”. La stadia, (rassegna di informazione tecnica dei geometri di Calabria). Anno XL n.1/2005.
- PUNDIT - Manual for use of portable ultrasonic non-destructive digital indicating tester. CNS Electronics Ltd, London, 76p.
- REGIONE CAMPANIA (2006) - A.G.C. LL.PP. –Settore Geologico Regionale, “Linee guida –Verifica strutturale degli Edifici in Cemento Armato in attuazione dell’O.P.C.M. 3274/03”.
- REGIONE TOSCANA (2004) - Giunta Regionale, Settore –Servizio Sismico Regionale, Direzione Generale delle Politiche Territoriali e Ambientali, Interventi Sperimentali di Prevenzione per la Riduzione del Rischio Sismico, Programma Regionale Vulnerabilità sismica Edifici in Cemento Armato (VSCA); allegato 1: “Istruzioni Tecniche, criteri per lo svolgimento di indagini diagnostiche finalizzate alla valutazione della qualità dei materiali in edifici esistenti in cemento armato.
- RIMINESI, C. (2012) - Tecniche e metodologie diagnostiche non-invasive – Termografia IR. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per la Conservazione e Valorizzazione dei Beni Culturali – Firenze. <http://www.icvbc.cnr.it/didattica/Istituto%20Salvemini/riminesi.pdf>.
- ROSSI-MANARESI, R., TUCCI, A. (1991) - Pore structure and the disruptive or cementing effect of salt crystallisation in various types of stone. Studies in conservation, 36, 53-58.
- ROTHERT, E., EGGERS, T., CASSAR, J., RUEDRICH J., FITZNER, B. (2007) - Stone properties and weathering induced by salt crystallization of Maltese Globigerina Limestone. In: Geological Society, London, Special Publications, 2007, 271, 189-199.
- SAMMUT, A. (1991) - An Assessment of Globigerina Limestone Resources. B.E. & A. dissertation, University of Malta.

- SANNA, U. (2012) - Dispense del corso “Obsolescenza, degrado e patologie della costruzione moderna”, parte 4, Il degrado dei materiali. Per il Master di II livello in Recupero e Conservazione Dell’Architettura Moderna. 32-36 (Non pubblicato).
- SANTARATO, G. (2004) - Sismologia, legge di Hooke e costanti elastiche. http://xoomer.virgilio.it/gbook/add_box/fisicaapplicg/SISMOLOGIA.PDF.
- SARDEGNACULTURA (2012) - *Cagliari, Torri di San Pancrazio e dell'Elefante*. <http://www.sardegnaicultura.it/j/v/253?s=17875&v=2&c=2465&c1=2635&t=1>
- SASSA, K., RYU, M., SUGIMOTO, T. (1984) - P-wave velocities in rock mass with water-saturated cracks. Proc. 6th Japan Symp. Rock Mech., Kyoto, Japan, 163-168.
- SCOTELLARO, C. (2006) - Influenza delle argille sulle proprietà elastiche ed elettriche di mezzi eterogenei e porosi ed applicazione del Modello Elettrosismico. (Tesi di dottorato). Università degli Studi di Napoli Federico II.
- SEGALA, A. (2011) - Analisi di difetti in giunti saldati, mediante rilevazione digitale ultrasonica. Tesi di laurea in Ingegneria Meccanica. Università degli Studi di Parma.
- SEGNI PULVIRENTI F., CECCHINI L., (1993) - Exma’. Pp 10.
- SERVIZIO TECNICO CENTRALE DEL CONSIGLIO SUPERIORE DEI LAVORI PUBBLICI (2008) - Linee guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito mediante prove non distruttive.
- SOUSA, L. M. O., SUAREZ DEL RIO, L. M., CALLEJA, L., RUIZ DE ARGANDOFIA, V. G., RODRIGUEZ-REY, A. (2005) - Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites, *Engineering Geology* 77, 153-168.
- SOUSA, L. M. O. (2007) - Granite fracture index to check suitability of granite outcrops for quarrying, *Engineering Geology* 92, 146-159.
- SPANO, C. (1989) - I molluschi del Langhiano superiore-Serravalliano inferiore del Cagliaritano (Sardegna meridionale). 1° - Bivalvi. *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem., Ser. A*: 96, 333-397, Pisa.
- SPANO, C. (1990) - I molluschi del Langhiano superiore-Serravalliano inferiore del Cagliaritano (Sardegna meridionale). 2° - I gasteropodi. *Boll. Soc. Sarda Sc. Nat.*: 27, 25-76, Sassari.
- THEODORAKEAS, P., IBARRA-CASTANEDO, C., SFARRA, S., AVDELIDIS, N.P., KOU, M., MALDAGUE, X., PAOLETTI, D., AMBROSINI, D. (2012) - NDT inspection of

plastered mosaics by means of transient thermography and holographic interferometry. *NDT and E International* vol. 47 April, 2012. p. 150-156.

UNI 10824-1 (2000) - Prove non distruttive – Termografia all'infrarosso – Termini e definizioni.

UNI 10922 (2001) - Allestimento di sezioni sottili e sezioni lucide di materiali lapidei colonizzati da biodeteriogeni.

UNI 11085 (2003) - Determinazione del contenuto d'acqua: Metodo ponderale.

UNI EN 13187 (2000) - Prestazione termica degli edifici – Rivelazione qualitativa delle irregolarità termiche negli involucri edilizi – Metodo all'infrarosso.

UNI EN 1330-4 (2010) - Prove non distruttive – Terminologia – Parte 4: Termini utilizzati nel controllo con ultrasuoni.

UNI EN 13791 (2008) - Valutazione della resistenza a compressione in sito nelle strutture e nei componenti prefabbricati di calcestruzzo.

UNI EN 12504-2 (2001) - Prove non Distruttive, Determinazione dell'indice sclerometrico.

UNI EN 12504-3 (2005) - Determinazione della forza di estrazione.

UNI EN 12504-4 (2005) - Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici.

UNI EN 14579 (2005) - Metodi di prova per pietre naturali – Determinazione della velocità di propagazione del suono.

UNI EN 473 (2008) - Prove non distruttive, qualificazione e certificazione del personale addetto alle prove non distruttive.

UNI EN ISO 928800 (2000) - Isolamento termico – Scambio termico per radiazione – Grandezze fisiche e definizioni.

WATANABE, T., SASSA, K. (1995) - Velocità and amplitude of P-waves transmitted through fractured zones composed of multiple thin low-velocity layers. *Int. J. Rock Mech. Miner. Sci. Geomech. Abstr.* 32 (4), 313-324.

WEI, Z.Q., EGGER, P., DESCOEUNDRES, F. (1995) - Permeability predictions for joined rockmass. *Int.J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 32, pp. 251-261.

WYLLIE, M.R.J., GREGORY, A.R., GARDNER, G.H.F. (1956) - Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics.* Pp 41-70.

WYLLIE, M.R.J., GREGORY, A.R., GARDNER, G.H.F. (1962) - Studies of elastic wave attenuation in porous media. *Geophysics.* Pp 569-589.

ZAMMIT, T., CASSAR, J., VELLA, A.J., TORPIANO, A. (2007) - Stone Newsletter on Stone Decay. In: Abstract from SWAPNET 2007 & Workshop on Limestone Decay and Conservation (Malta 24th – 26th May 2007), 32-33.

N.B.: Tutte le illustrazioni e i dati contenuti nel testo, dove non diversamente specificato, sono elaborati di proprietà dell'autore.