

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DELLA CALABRIA

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE , FISICHE E NATURALI
DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA

DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA
XXI CICLO (2005- 2008)

Settore scientifico disciplinare GEO/09: Georisorse minerarie e applicazioni
mineralogico-petrografiche per l'ambiente ed i beni culturali

TESI DI DOTTORATO

INDAGINI ARCHEOMETRICHE FINALIZZATE ALLO STUDIO DELLE FORME DI ALTERAZIONE E DEGRADO DEI MATERIALI LAPIDEI NATURALI E ARTIFICIALI IN AMBIENTE SUBACQUEO

Tutor

Prof. Gino Mirocle Crisci



Co-tutor

Dott. Mauro F. La Russa

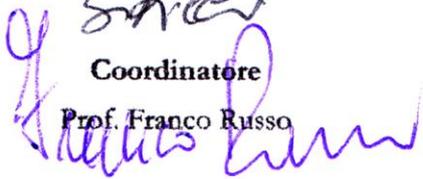


Dott.ssa Sandra Ricci



Coordinatore

Prof. Franco Russo



Dottoranda

Dott.ssa Maria Macchione



*A papà e mamma
ringraziandoli per avermi sostenuto
e dato la possibilità di arrivare
a questo splendido traguardo*

PREMESSA

In questi ultimi anni si è assistito ad un maggiore interesse per il recupero del patrimonio storico-artistico in ambiente subacqueo finalizzato a restauri di tipo conservativo. In questa ottica ha assunto una rilevante importanza l'indagine diagnostica rivolta alla raccolta di informazioni, che riguardano in particolare i processi e le forme di degrado in ambiente sottomarino.

L'archeologia subacquea rappresenta un aspetto particolare dell'archeologia, occupandosi dello studio dei resti e dei manufatti sommersi.

Lo sviluppo di tale disciplina è molto recente. Escludendo le operazioni di recupero avvenute agli inizi del novecento da parte di alcuni pescatori, i primi veri e propri interventi archeologici subacquei iniziarono poco dopo la metà del secolo, tra la fine degli anni 50 e gli anni 60.

Gli anni 70 sono stati significativi per il settore dell'archeologia subacquea, coincidendo, infatti, con il ritrovamento dei Bronzi di Riace, fatto che segna l'inizio di un crescente interesse per tale disciplina.

E' interessante considerare che gli oggetti immersi hanno una "fedeltà di conservazione" maggiore rispetto a quelli conservati in ambiente subaereo, risultando così su questi ultimi, di valenza superiore dal punto di vista storico-culturale.

Esiste un'esigua letteratura scientifica a carattere minero-petrografico riguardo il degrado dei materiali lapidei naturali ed artificiali ritrovati in ambiente subacqueo. I primi studi sono riconducibili a lavori condotti da Mendel e Peterson (1972) relativi agli effetti del degrado fisico e chimico esercitato dall'acqua su materiali di diversa tipologia.

Successivamente, fu posta maggiore attenzione allo studio dei materiali ceramici (Pearson, 1987) e alle loro diverse forme di alterazione e degrado in ambiente subacqueo.

La presente tesi rappresenta un primo contributo scientifico volto allo studio diagnostico sia di reperti archeologici rinvenuti nell'area marina di Crotona che di provini lapidei "invecchiati" artificialmente in ambiente subacqueo nell'area sia di Crotona che di Baia.

L'attività di ricerca è inserita all'interno di un progetto più ampio, denominato MESSIAH (MEtologie, Strumenti e Servizi Innovativi per l'Archeologia subacquea) che ha visto coinvolto pienamente il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università della Calabria.

In particolare, la ricerca è stata articolata in due parti connesse tra di loro.

La prima parte si è incentrata sullo studio e sull'indagine dei reperti archeologici rinvenuti nell'area di Capo Colonna (Kr), sull'individuazione delle principali forme e processi di alterazione e degrado e sugli aspetti tecnologici di tali materiali.

La seconda parte della ricerca si è concentrata esclusivamente sull'analisi delle interazioni tra biodeteriogeni e provini lapidei immersi nei due contesti marini prima citati, ovvero Crotona e Baia.

Lo studio si è avvalso di una collaborazione in atto ormai da diversi anni tra il Dipartimento di Scienze Geologiche dell'Università della Calabria, le Soprintendenze territoriali e l'Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro (ISCR) di Roma, che ha permesso di affrontare in modo esauriente le problematiche che interessano il patrimonio storico-archeologico posto in esame.

I risultati ottenuti hanno evidenziato l'importanza dell'approccio diagnostico applicato alle problematiche inerenti l'alterazione ed il degrado dei materiali lapidei sommersi, ma soprattutto hanno consentito di formulare un protocollo guida per ciò che concerne la diagnostica di un dato reperto rinvenuto in mare.

CAPITOLO I

IL DEGRADO DEI MATERIALI LAPIDEI IN AMBIENTE MARINI

1.1 Introduzione

Il degrado dei materiali lapidei da parte dei biodeteriogeni è un fenomeno molto complesso cui prendono parte differenti tipologie di organismi. Così come nell'ambiente terrestre, anche nell'ambiente marino, in misura ancora più ampia e con maggiore complessità, si stabiliscono una serie di "relazioni" fra i singoli organismi ed il substrato su cui si trovano.

E' importante delineare un quadro completo degli aspetti biotici ed abiotici utili a valutare l'importanza dei singoli parametri di un degrado poiché solo da un'analisi di questo tipo può scaturire un efficace piano d'intervento volto non solo ad eliminare i biodeteriogeni presenti ma anche, laddove possibile, a prevenire il determinarsi di nuovi fenomeni di biodeterioramento. Lo studio non può quindi prescindere da un approccio di tipo ecologico.

Un approccio ecologico è fondamentale in quanto prende in considerazione le numerose interrelazioni fra le varie popolazioni biologiche ed i fattori fisico-chimici dell'ambiente circostante in cui si trovano situati i materiali.

1.2 Il biodeterioramento dei manufatti sommersi



Fig. 1 - Materiali lapidei sommersi

I fenomeni di biodeterioramento dei materiali sono strettamente correlati sia alla natura chimico-fisica del substrato che alle caratteristiche circostanti. Esiste un complesso sistema di interrelazioni fra organismi-materiali-ambiente che ci permette di comprendere la genesi, la dinamica e le specificità dei fenomeni di alterazione dei materiali e quindi anche le strategie ottimali per prevenirne il degrado.

Nell'ambito della conservazione dei Beni Culturali è necessario acquisire dei concetti, seppure minimi, di ecologia di base, soprattutto in relazione alle definizioni delle esigenze ecologiche dei vari organismi e all'influenza che i parametri ambientali possono esercitare sugli stessi. Se l'ecologia è la scienza che studia le relazioni fra gli organismi e l'ambiente, l'ecologia del biodeterioramento si occupa delle relazioni fra gli organismi che possono attaccare i materiali e i fattori ambientali che ne condizionano lo sviluppo.

I manufatti immersi in mare o in ambienti d'acqua dolce rappresentano un *casus* complesso, con un'alta varietà di tipologie di degrado legate soprattutto alle forme di alterazione di tipo chimico-fisico e biologico.

Gli ambienti acquatici, sia marini che lacustri, possono costituire un habitat di giacitura per manufatti lapidei, ceramici, metallici e lignei di interesse storico-archeologico.

Un manufatto di interesse storico-artistico, come un relitto o una statua, è soggetto, durante la sua permanenza in mare, a colonizzazioni da parte del benthos.



Fig. 2 - Materiali ceramici

La crescita biologica sul materiale comporta una serie di interazioni dovute alle attività vitali degli esseri viventi. Per quanto riguarda i manufatti lapidei, in genere si tratta di strutture murarie facenti parte di siti archeologici costruiti in prossimità della costa e attualmente sommersi.

Le loro condizioni di giacitura possono cambiare in funzione della profondità, dei moti di marea o dei fenomeni di bradisismo. Altri manufatti, quali reperti metallici o lignei possono trovarsi sommersi per cause accidentali; molto frequente è il caso di imbarcazioni naufragate in mare.

Nell'ambiente acquatico la distribuzione di organismi e microrganismi dannosi per i manufatti risulta influenzata da diversi fattori, quali il tipo di substrato, la torbidità delle acque, la luce, la temperatura, la disponibilità di ossigeno e il pH (M.P.Nugari e S.Ricci, 2005).

Analizzando l'ecosistema marino, si possono trovare diverse comunità costituite da microrganismi, organismi vegetali e animali. I microrganismi rappresentano spesso i colonizzatori primari e si



Fig. 3 - Colonizzazione biologica di strutture murarie sommerse

sviluppano sulle superfici sommerse, formando biofilms che determinano l'instaurarsi di processi di varia natura, tra i quali quelli di corrosione, e inoltre favoriscono lo sviluppo di organismi di dimensioni maggiori come macroalghe e animali bentonici (Spugne, Serpulidi).

I microrganismi presenti nel biofilm o nei sedimenti in cui gli oggetti si trovano sepolti, possono indurre condizioni di anaerobiosi che permettono lo sviluppo di altri gruppi, quali batteri anaerobi; sono noti, ad

esempio, i fenomeni di corrosione provocati da batteri solfatoriduttori sulle superfici di manufatti metallici. Gli organismi acquatici che s'insediano sul biofilm sono prevalentemente bentonici, in grado di colonizzare i materiali immersi in mare, aderendovi per parte o per tutto il loro ciclo vitale e a volte instaurando con essi relazioni di tipo trofico.

Gli organismi bentonici sono rappresentati da vegetali (cianobatteri, alghe) e da animali (spugne, briozoi, coralli, molluschi, ecc.) che aderiscono a un substrato rigido.

La crescita degli organismi bentonici determina la formazione di uno strato, denominato biofouling, che si manifesta come incrostazioni, più o meno spesse, sulle superfici dei materiali. In alcuni casi gli organismi bentonici possono scavare gallerie all'interno dei materiali lapidei e, in tal caso, vengono definiti endolitici.

Le strutture lapidee archeologiche possono essere considerate analoghe, per natura ed esposizione, ai fondali rocciosi sommersi. Le relazioni che gli organismi bentonici instaurano con il substrato roccioso, metallico o ligneo, sono influenzate da diversi fattori ambientali e sono molto importanti nel caso dei vegetali; infatti le micro-macroalghe che si insediano sulle strutture sommerse non sono in grado di spostarsi e, quindi, i parametri ambientali presenti nella zona di crescita determinano in modo decisivo lo sviluppo.

La luce è il parametro che maggiormente condiziona la distribuzione delle alghe bentoniche e delle fanerogame nell'ambiente acquatico. L'intensità e la qualità della luce variano sensibilmente con la profondità e con la torbidità dell'acqua, oltre che con le caratteristiche topografiche del fondo.

Per quanto riguarda gli organismi animali, la luce non esercita un ruolo diretto di condizionamento anche se può influenzarne lo sviluppo in relazione ai rapporti trofici con i vegetali. Il fitobenthos delle superfici lapidee, rappresentato dalla colonizzazione vegetale bentonica, modifica la sua composizione floristica in relazione alla profondità. Il piano epilitorale, interessato saltuariamente da spruzzi d'acqua, il piano sopralitorale e quello eulitorale, compresi nella fascia di marea, sono colonizzati prevalentemente da Cianobatteri epilitici ed endolitici, mentre procedendo con la profondità, subentrano le alghe eucariotiche (Giaccone *et al.*, 1994). La zona interessata dalla colonizzazione algale arriva generalmente fino a 150-200 metri di profondità, limite di penetrazione della luce. Essendo lo sviluppo delle alghe strettamente legato alla presenza di

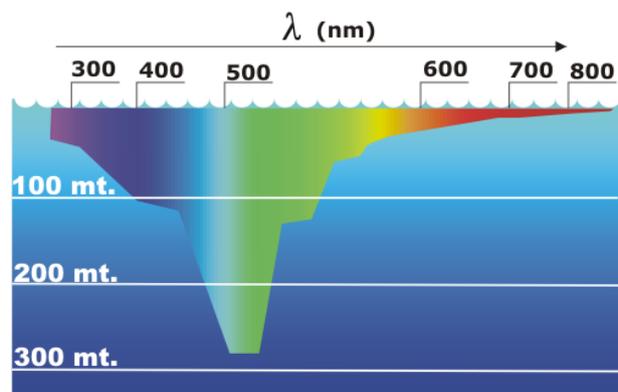


Fig. 4 - Distribuzione della luce a diverse profondità

luce, il fouling algale assume particolare importanza nella zona più vicina alla superficie dell'acqua.

Le zone più profonde sono colonizzate esclusivamente da pochi gruppi di alghe, per lo più Rhodophyceae, in grado di espletare in modo efficiente la funzione clorofilliana, per la presenza, nelle loro cellule, di ficoeritrina, pigmento che assorbe la luce verde-azzurra, ossia la radiazione con massima capacità di penetrazione.

La colonizzazione bentonica animale, costituita dallo zoobentos, si trova generalmente associata alle formazioni vegetali, nei contesti situati all'interno della zona interessata dalla penetrazione della luce. Tra i biodeteriogeni bentonici animali i più rappresentativi appartengono alle Spugne, Serpulidi, Briozoi, Antozoi e i Molluschi soprattutto Bivalvi.

A differenza degli organismi autotrofi, i microrganismi eterotrofi, quali batteri e funghi presentano una distribuzione in ambiente acquatico legata principalmente alla disponibilità di sostanze organiche e, essendo per lo più aerobi, alla concentrazione di ossigeno. La presenza di funghi in ambienti marini, oceanici e pelagici è assai scarsa, mentre è significativa nelle acque costiere, più ricche di sostanza organica. Nelle acque marine sono frequenti Ascomiceti e Deuteromiceti in grado di tollerare sia ampi range di concentrazioni saline sia piccole variazioni di salinità, anche se sono considerati funghi marini solo quelli capaci di vivere e riprodursi a concentrazioni saline del 30%.

Oltre alla salinità, un altro parametro che influisce sulla distribuzione delle specie fungine in ambiente marino è la temperatura.

Gli studi applicati al biodeterioramento di strutture sommerse sono nella maggior parte dei casi rivolti alla identificazione delle alghe responsabili del biofouling di scavi navali.

Le alghe marine sono considerate uno dei gruppi maggiormente coinvolti nel degrado di substrati naturali, quali rocce, manufatti in pietra, vetro, sostanze plastiche e metalli.

Le alghe bentoniche colonizzatrici del Mediterraneo appartengono principalmente ai gruppi sistematici delle *Bacillariophyceae*, *Rhodophyceae*, *Phaeophyceae*, *Chlorophyceae*.

Il degrado comprende processi di solubilizzazione e perforazione delle rocce, danni dovuti all'azione meccanica esercitata sul substrato e alla penetrazione di strutture vegetative (filamenti o propagali) o di porzioni di tallo (rizoidi) con funzione di ancoraggio (Fletcher, 1998).

Studi fatti sulle strutture sommerse delle peschiere romane appartenenti al sito di Torre Astura (Nettuno, Roma), risalenti al I secolo a.C. hanno permesso di studiare come la flora algale sia altamente condizionata dalle caratteristiche fisico-chimiche dell'acqua (Ricci, 2003).

Nonostante i manufatti si trovassero a profondità ridotta (0,5-1,5 metri), erano interessati da un buon ricambio di acqua che garantiva un elevato apporto di ossigeno e di nutrienti alle biocenosi presenti, mentre altre strutture, situate in zone meno esposte e meno ossigenate, mostravano una minore ricchezza floristica. Interessanti sono anche le sperimentazioni condotte *in situ* su provini di cava (marmo di Carrara e calcare) immersi in mare alla profondità di 1-2 metri. Tali sperimentazioni hanno evidenziato già dopo 2 mesi una colonizzazione algale e animale; si è potuto in tal modo stabilire la dinamica e i tempi di colonizzazione biologica nelle condizioni ambientali e di giacitura del sito.

Uno dei primi lavori scientifici inerenti le forme di alterazione e degrado presenti sui materiali lapidei in ambiente marino è quello condotto da Weier nel 1973.

1.3 Biofouling e biofilm marino

Il fenomeno del fouling è assai noto e si riferisce alle formazioni che ricoprono la superficie degli oggetti sommersi, come le carene delle barche, i manufatti in pietra, metallo, legno, plastica, i cordami, conchiglie, perfino il tegumento dei grandi mammiferi acquatici.

Il termine fouling deriva dal verbo inglese *to foul*, che significa letteralmente insudiciare, incrostare, ed indica appunto l'insieme delle incrostazioni rilevabili sui corpi sommersi. Più specificamente si parla di biofouling poiché l'intero processo è determinato dalla colonizzazione dinamica delle superfici sommerse ad opera di numerosi organismi viventi, sia unicellulari che pluricellulari, cui si associa in modo più o meno massiccio la deposizione di minerali. Il termine biofouling (bio:vita e fouling: immondizia), sta ad indicare una incrostazione biologica. Il biofouling è l'accumulo di microrganismi, di alghe, di piante e di animali su strutture sommerse. Quando il biofouling si presenta sulle superfici di tutti gli organismi marini viventi, prende il nome di epibiosis.

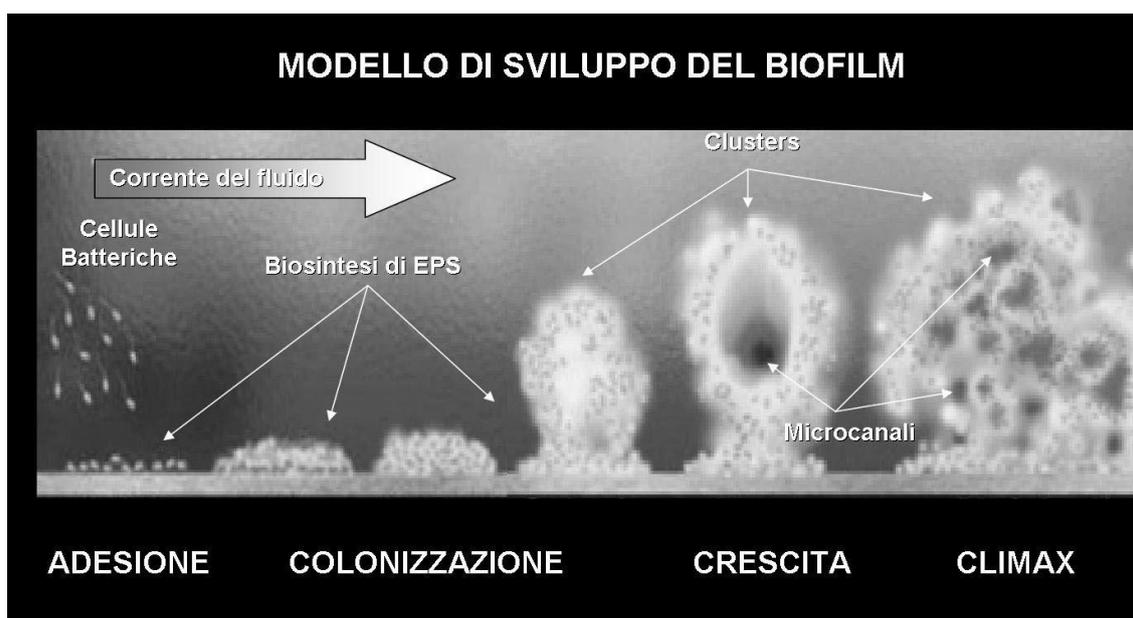


Fig. 5 - L'architettura dei biofilm al climax consiste in un intricato reticolo entro il quale i microrganismi formano cluster o microcolonie separate da vuoti interstiziali

La condizione di biofouling sulla superficie dei corpi sommersi dipende da diversi fattori, tra loro interagenti, come la natura chimica del materiale, la tensione critica superficiale dello stesso, l'abbondanza e la varietà degli organismi presenti nell'ambiente, la profondità delle acque e la natura del moto ondoso e delle correnti.

Il biofouling si divide in microfouling o formazione del biofilm ed adesione batterica, e in macrofouling, attacco di organismi marini di grandi dimensioni come ad esempio policheti, briozoi, alghe, ecc. A prescindere dalle differenze legate all'ambiente ed al substrato, è possibile descrivere

brevemente gli eventi che si susseguono attivamente dopo l'immersione di un corpo solido in ambiente acquatico.

Inizialmente, nel giro di pochi minuti, inizia la deposizione di un biofilm macromolecolare, che è costituito in prevalenza da polisaccaridi e proteine. Questo materiale organico si trova disciolto nell'acqua e deriva dalla decomposizione di organismi vegetali ed animali, ovvero rappresenta gli "acidi umici" del mare. Il processo di formazione di questo primo involucro, che si realizza nel tempo di 1-3 giorni, rappresenta un evento "influenzante" in quanto nessun organismo, vivente o morto, e nemmeno il particellato inorganico, può depositarsi prima che tale rivestimento sia completato (Baier, 1999).

La fase successiva, anch'essa della durata di pochi giorni, consiste nell'attecchimento al biofilm primario di organismi unicellulari tra cui prevalgono inizialmente batteri corti di forma bastoncellare, cui si aggiungono organismi unicellulari fotosintetici il cui numero diviene progressivamente dominante (Baier, 1999). In questa fase, viene a formarsi il biofilm microbico, caratterizzato dalla produzione, talvolta molto abbondante, di secrezioni collose di natura mucopolisaccaridica (Davis and Williamson, 1995). Mentre a livello del biofilm microbico prosegue la moltiplicazione dei microrganismi primari, si verifica un'ulteriore assorbimento di macromolecole organiche e di nuovi microrganismi di varie forme, bastoncellari, sferiche, filamentose (Baier, 1999). La crescita del biofilm microbico, anche grazie all'aumento dimensionale degli organismi filamentosi, si realizza non solo come aumento di spessore, ma è generalmente caratterizzata dalle formazioni di vere e proprie appendici filamentose che agevolano la cattura e l'adesione di spore, microalghe, funghi e protozoi, oltre che di particelle inorganiche (Baier, 1999).

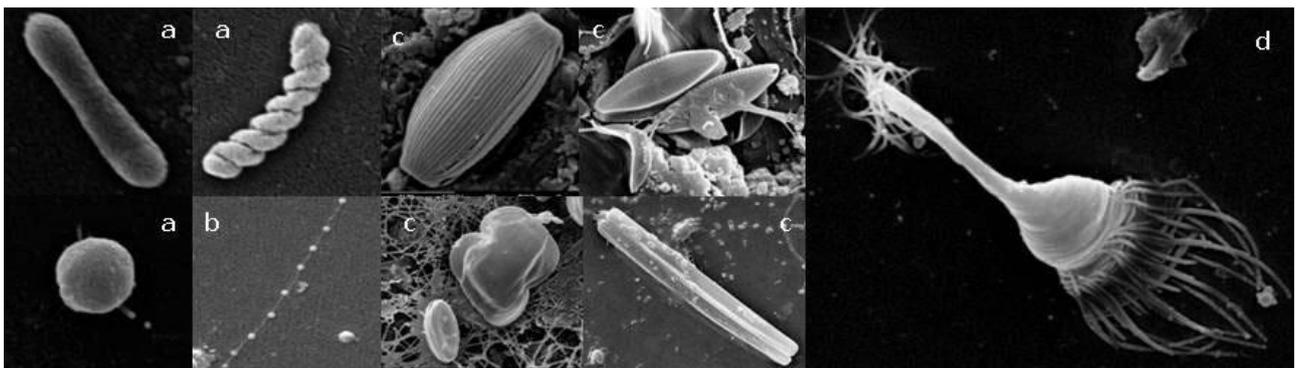


Fig. 6 - Immagini al SEM di alcuni microrganismi presenti in un biofilm marino: (a) batteri, (b) funghi, (c) diatomee, (d) protozoi

È a questo stadio che, solitamente dopo circa una settimana dall'immersione, inizia la colonizzazione da parte di organismi pluricellulari, sia produttori primari che degradatori (Davis and Williamson, 1995). L'ultimo stadio di sviluppo è rappresentato dall'attecchimento e dalla crescita di organismi più complessi, tra cui tipicamente macroalghe e numerosi invertebrati marini.

Biofilm microbici, detti anche microfouling, costituiti da organismi unicellulari (per lo più batteri) che secernono sostanze esopolimeriche, si producono su tutte le superfici in contatto con mezzi umidi o liquidi. In condizioni naturali, la produzione di biofilm è un evento spontaneo, conseguente alla proliferazione e alla stratificazione delle cellule. Le cellule sono immobilizzate e legate da una matrice esopolimerica di origine microbica, assorbente e porosa che non contiene solo cellule microbiche. In seguito ad un assorbimento di macromolecole organiche e l'insediamento di nuovi microrganismi quali spore, microalghe, funghi e protozoi di varie forme, si assiste ad una crescita del biofilm marino. Per quanto riguarda i materiali sommersi, si può dire che sono tutti potenzialmente colonizzabili, anche se con alcune differenze: quelli che presentano bassa energia superficiale, infatti, resistono meglio all'iniziale formazione del biofilm rispetto a quelli che hanno una elevata energia di superficie.

1.4 Manufatti lapidei sommersi e biodeteriogeni

L'ambiente marino ospita spesso manufatti o siti archeologici (in particolare resti di strutture architettoniche).

L'ambiente acquatico, e in particolare quello marino, dove la vita biologica è più intensa, è particolarmente aggressivo nei confronti degli oggetti che nasconde. Sono pochi i materiali in grado di resistere senza subire modificazioni a una lunga permanenza in mare, sottoposti all'azione di fattori fisici, chimici e biologici. Questi ultimi possono essere più o meno intensi e complessi a seconda delle caratteristiche dell'ambiente, del grado di salinità e di acidità, della temperatura con le sue variazioni, dei sali minerali, dei movimenti e degli agenti erosivi, i microrganismi, la flora e la fauna, ecc.

Nel peggiore dei casi, i materiali vengono distrutti completamente; nel migliore, solo il loro aspetto esteriore è modificato dall'erosione, dall'ossidazione e dall'accumularsi di concrezioni. I materiali più resistenti come la ceramica, il vetro, la pietra, subiscono anch'essi le conseguenze dell'erosione meccanica e si ricoprono di concrezioni.

Le tipologie di manufatti sommersi in ambiente marino riguardano:

- resti di antichi edifici o strutture architettoniche, costruiti sulla costa, che possono trovarsi sommersi a causa di fenomeni di bradisismo o per l'innalzamento del livello delle acque marine,
- manufatti lapidei trasportati con navi e naufragati,
- pali e tavolati lignei,
- blocchi di materiale lapideo,
- opere in muratura,
- opere miste.

Lo stato di conservazione cambia in relazione alle condizioni di giacitura (profondità, distanza dalla costa, tipo di fondale, caratteristiche chimico-fisiche delle acque).

Per poter valutare i processi di degrado indotti da microrganismi ed organismi marini è necessario eseguire delle indagini specifiche volte ad evidenziare i diversi processi di degrado e identificare le diverse forme epilittiche ed endolitiche che attaccano il substrato. Queste indagini danno delle indicazioni sullo stato di conservazione del manufatto e permettono di definire la tipologia e l'entità del



Fig. 7 - Colonizzazione biologica dei materiali lapidei sommersi

degrado biologico.

Come gli esseri viventi, anche i manufatti che si trovano in un determinato contesto ne subiscono inevitabilmente l'influenza e soggiacciono alle peculiari regole o alle leggi che lo caratterizzano.

Infatti, la presenza di determinati parametri condiziona la vita e la proliferazione degli organismi biodeteriogeni che possono ricoprire o degradare i manufatti sommersi. Tra i biodeteriogeni, particolare importanza assumono gli organismi bentonici sessili che sono in grado di

colonizzare rocce o manufatti sommersi, poiché la loro adesione è permanente e stabile la dimora. I microrganismi bentonici costituiscono i colonizzatori primari di un substrato in quanto sono in grado di colonizzare le superficie formando uno strato, detto biofilm, al quale consegue l'instaurarsi di ulteriori colonizzazioni, dovute all'impianto di organismi di dimensioni maggiori, rappresentate da alghe e da animali.

L'entità delle interazioni organismo-substrato differisce in funzione dei seguenti fattori:

- tipo di organismo,
- modalità di adesione,
- capacità di interazione con il substrato di crescita,
- tipo di substrato.

La successione ecologica, che segue la colonizzazione di un substrato scoperto, è un ciclo di trasformazione e sviluppo all'interno di un popolamento.

La successione è influenzata dalle fluttuazioni ambientali stagionali e dalle dimensioni del substrato a disposizione.

Il ciclo successionale è stato studiato particolarmente, a partire dalle fasi di colonizzazione su substrato nudo (Huvè) e poi su pannelli artificiali di vario materiale (Relini, 1998).

Lo studio dei popolamenti bentonici, ed in particolare della loro porzione sessile, mediante l'uso di substrati artificiali immersi per periodi determinati, costituisce una tecnica efficace ed ampiamente utilizzata poiché permette di seguire l'evolversi dei popolamenti che si insediano sui supporti utilizzati.

Dalle osservazioni fatte sulle comunità presenti su pannelli o substrati artificiali (comunità fouling) è risultato che la limitazione della superficie costituisce un ostacolo al normale processo di successione.

Abbiamo visto come i materiali lapidei, venendo a contatto con l'ambiente marino vengono utilizzati dagli organismi acquatici come substrati di crescita e risultano quindi colonizzati da popolamenti biotici diversificati in funzione della profondità.

Nell'ambito degli studi relativi alla caratterizzazione delle alterazioni dei materiali lapidei e dei pannelli artificiali sommersi in ambiente marino, troviamo diversi autori che hanno dato un significativo contributo scientifico.

In particolare Relini, il quale ha condotto numerosi studi sulla comunità fouling e macrofouling di diverse tipologie di substrato, tra cui il cemento. Inoltre, in letteratura sono diversi i contributi scientifici relativi all'insediamento e all'accrescimento del macrofouling su pannelli artificiali immersi, tra i quali quelli nella Laguna di Venezia (Moretti e Mizzan, 1992; Ambrogi e Cornelio, 2001), che hanno permesso di monitorare l'evoluzione dei popolamenti insediatisi su diversi supporti in diversi periodi di immersione.

CAPITOLO II

INQUADRAMENTO GEOLOGICO E ARCHEOLOGICO DELL'AREA DI CROTONE E BAIA

Questo lavoro di tesi ha interessato lo studio di due diverse aree: Capo Colonna, che fa parte del bacino crotonese, e l'area di Baia posta ad occidente del golfo di Pozzuoli.

Le due aree selezionate mostrano un grande interesse non solo dal punto di vista geologico ma anche per il loro patrimonio archeologico sommerso.

2.1 Bacino crotonese

Il bacino crotonese è interpretato, in genere, come un membro del bacino di avansarco ionico, localizzato lungo il margine meridionale dell'Arco Calabro (Zecchin et al., 2004).

Il bacino crotonese comprende quella porzione di territorio calabro che si estende dal massiccio cristallino della Sila verso e fino al mar Ionio, limitato a Sud dal Golfo di Squillace ed a Nord dalle formazioni Mioceniche e Pre-mioceniche di S.Nicola dell'Alto. Il bacino di Crotona rappresenta un settore di un complesso bacino sedimentario Mio-Pliocenico caratterizzato da sedimentazione clastica ed evaporitica messa in posto durante il Messiniano superiore.

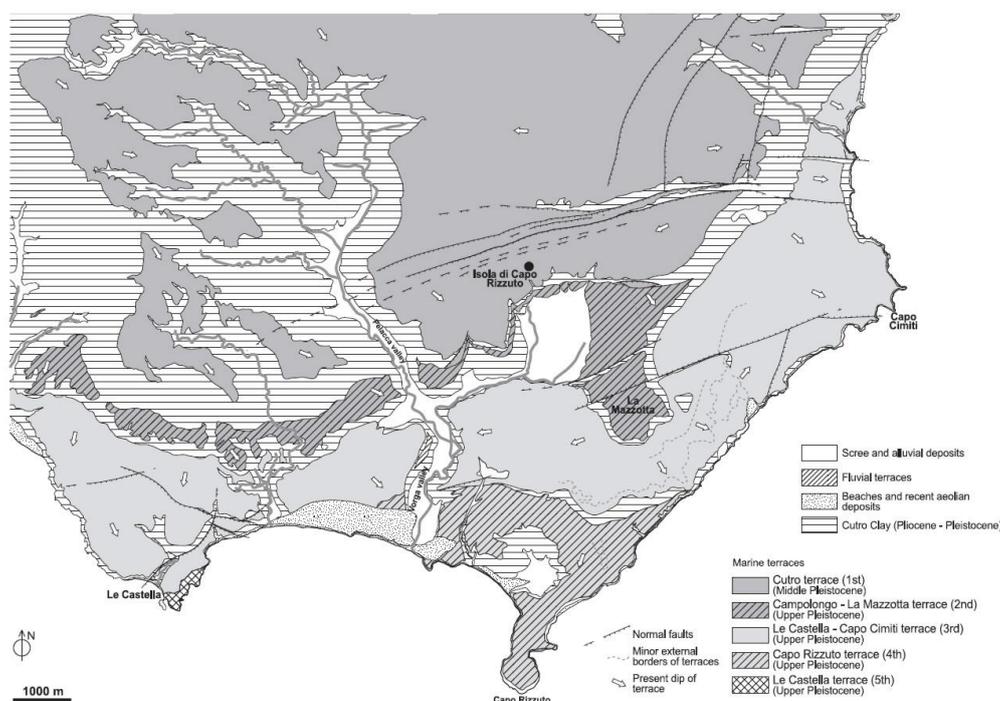


Fig. 8 - Mappa geologica del bacino crotonese (Zecchin et al.; 2004)

La stratigrafia del Bacino di Crotona è stata definita per primo da Ogniben in un suo lavoro del 1955, in cui distingue, dal basso verso l'alto, le seguenti formazioni:

- Formazione arenaceo-conglomeratica di San Nicola dell'Alto;
- Formazione delle argille marnose del Ponda;
- Formazione del Tripoli;
- Formazione marnosa-calcareo di base;
- Formazione dei Gessi;
- Formazione del Vitruvio;
- Formazione della Molassa di Zinga;
- Formazione delle Argille marnose di Spartizzo;
- Formazione della Molassa di Scandale;
- Formazione delle Argille marnose di Timpa Bisio;
- Formazione delle Arenarie di Strongoli;
- Formazione delle argille marnose di Gigliolo.

Un importante contributo per la ricostruzione stratigrafica del Bacino crotonese fu fornito da Roda nel lavoro del 1964, in cui si evidenzia che la deposizione dei depositi affioranti dal bacino sono il risultato di tre cicli sedimentari.

Il primo ciclo (Miocene medio-Messiniano) ha avuto inizio nel Seravalliano-Tortoniano con la messa in posto di depositi di ambiente marino profondo appartenenti alla Formazione di San Nicola dell'Alto ed alla Formazione Argillosa Marnosa del Ponda ed è proseguita con la sedimentazione evaporitica (Tripoli e Formazione Evaporitica inferiore). Tale ciclo si chiude con la deposizione delle Argille Scagliose.

Il secondo ciclo è stato caratterizzato dalla presenza di sedimenti evaporitici risedimentati (Formazione detritico salina) e terrigeno evaporitici (Formazione Evaporitica superiore) e si chiude con una sequenza terrigena costituita dalla Formazione dei conglomerati delle Carvane, delle marne argillose dei Cavalieri e della Molassa di Zinga.

Il terzo ciclo ha avuto inizio nel Pliocene medio ed è terminato nel Calabriano. Di tale ciclo fa parte la Formazione delle Argille marnose di Spartizzo, dalla Molassa di Zinga, dalle Argille Marnose di Cutro ed infine dalla Molassa di San Mauro.

Di seguito è riportata una descrizione della natura litologica delle formazioni sopra riportate.

La Formazione di San Nicola dell'Alto (Seravalliano-Tortoniano) poggia su un basamento cristallino ed è costituita da depositi terrigeni conglomeratici ed arenacei. Le caratteristiche sedimentologiche e tessiture permettono di associare la loro deposizione a meccanismi di massa tipici di ambienti

alluvionali. Le arenarie di tale formazione mostrano una composizione quarzoso-feldspatica (Barone et al.).

La Formazione del Ponda è caratterizzata da depositi argilloso-marnosi del Tortoniano. In funzione delle caratteristiche fisiche, si possono distinguere all'interno di essa tre membri. Un membro inferiore caratterizzato alla base per circa 5-10 m da un'alternanza di livelli arenitici, talora con una evidente componente bioclastica. Verso l'alto è presente la facies caratterizzata da intervalli decimetrici pelitico-marnosi di colore grigio-scuro alternati ad areniti grigio-chiaro e siltoso-sabbiosi. Il membro centrale ha uno spessore di 15-20 m ed è costituito da corpi arenitici a granulometria variabile, da grossolana a media, con frequenti *clay chips* alla base. Il membro superiore si sviluppa per uno spessore di 40 m ed è costituito da un'alternanza di marne argillose ed argille marnose. In questo membro sono presenti a varie altezze intervalli centimetrici arenitici rossastri e pelitici bruno-rossastri.

La Formazione Evaporitica superiore (Messiniano) è costituita da un'alternanza di peliti da grigio a grigio-bluastré e pelito siltoso-sabbiose, con intercalati a varie altezze stratigrafiche. Gli intercalati sono corpi, di spessore da 3 a 15 m, di gessoareniti, arenarie, arenarie gessose e marne.

La Formazione delle Carvane (Messiniano sup.) è formata da conglomerati all'interno dei quali si intercalano arenarie; le areniti hanno una composizione quarzolitica.

La Formazione di Zinga (Pliocene inferiore) è suddivisa da Zecchin (2004) in tre unità stratigrafiche:

- Zinga 1, costituita da marne (Formazione dei Cavalieri) a cui seguono arenarie di composizione quarzoso-feldspatica e conglomerati;
- Zinga 2 e Zinga 3 (Formazione di Belvedere).

Le areniti della Formazione di Zinga sono caratterizzate da due petrofacies (A e B). Le arenarie delle petrofacies A hanno una composizione quarzoso-feldspatica. Tra i frammenti faneritici e litici abbondano quelli di natura metamorfica rispetto a quelli di natura sedimentaria e plutonica. Le arenarie appartenenti alla petrofacies B sono di natura quarzoso-feldspatica ma è abbondante la componente carbonatica intrabacinale rappresentata dalla classe dei bioclasti (Barone et al.).

2.2 Geologia dell'area di Capo Colonna

In corrispondenza del Marchesato crotonese, il litorale ionico si innalza a formare il cosiddetto promontorio di Capo Rizzuto, consistente in una serie di terrazzi marini che sviliscono verso il mare sotto forma di scogliere costituite da conglomerati pleistocenici con intercalazioni di arenarie e calcareniti (Capo Colonna, Capo Cimiti, Capo Rizzuto).

L'area di Capo Colonna è caratterizzata dalla presenza di una serie di piani dislocati a varie altezze, costituiti da depositi di terrazzi marini del Pleistocene. Dal punto di vista della composizione, tali

depositi sono rappresentati da sabbie, arenarie quarzose a cemento calcareo spesso con stratificazione incrociata, calcareniti e calcari bioclastici ed algali con intercalazioni conglomeratiche e ghiaiose e con rare bande argillose; il loro ambiente sedimentario risulta caratterizzato da acque basse e litorali. L'origine di questi depositi è dovuta dunque a fenomeni di regressione marina. I depositi Pleistocenici, la cui resistenza all'erosione dipende dal grado di cementazione a calcite, poggiano in discordanza sui sedimenti del Pliocene-Calabriano rappresentati da argille siltose con intercalazioni di silts, sabbie sottili e strati di arenarie tenere a cemento calcareo. La totale assenza di orizzonti sabbioso-arenacei, appartenenti alla stessa formazione è da attribuirsi alla maggiore distanza dalla linea di costa che non ha consentito la deposizione degli apporti terrigeni più grossolani.

I sedimenti Plio-Calabriani affiorano lungo i pendii che separano i diversi terrazzi e spesso risultano ricoperti da materiale di dilavamento e da detrito proveniente dai depositi più recenti sovrastanti. L'affioramento di depositi argillosi lungo la scarpata costiera influenza la stabilità della falesia; in effetti la scarsa resistenza all'erosione delle argille da parte dell'azione del moto ondoso, determina continui scalzamenti al piede delle scarpate, determinando il crollo anche delle litologie Pleistoceniche maggiormente resistenti. Tale fenomeno determina un accelerato processo di arretramento della costa (Ietto et al.).

2.3 Geoarcheologia dell'area crotonese

L'intero territorio crotonese è interessato da innumerevoli resti archeologici, dal momento che la nuova cittadina è costruita sull'antica colonia della Magna Grecia.

In particolare, l'Area Marina Protetta di Capo Rizzuto con i suoi promontori è ricca di reperti archeologici.

L'Area Marina Protetta Capo Rizzuto istituita con decreto interministeriale del 12 Dicembre del 1991, si estende per 42 chilometri lineari di costa per un totale di 14721 ettari di superficie e risulta essere una delle Aree Marine Protette tra le più grandi d' Europa. L'Area Marina Protetta Capo Rizzuto è compresa tra i promontori di Capo Colonna e Barco Vercillo ed è suddivisa in:

- zona A, di riserva integrale,
- zona B con vincoli più larghi e
- zona C.

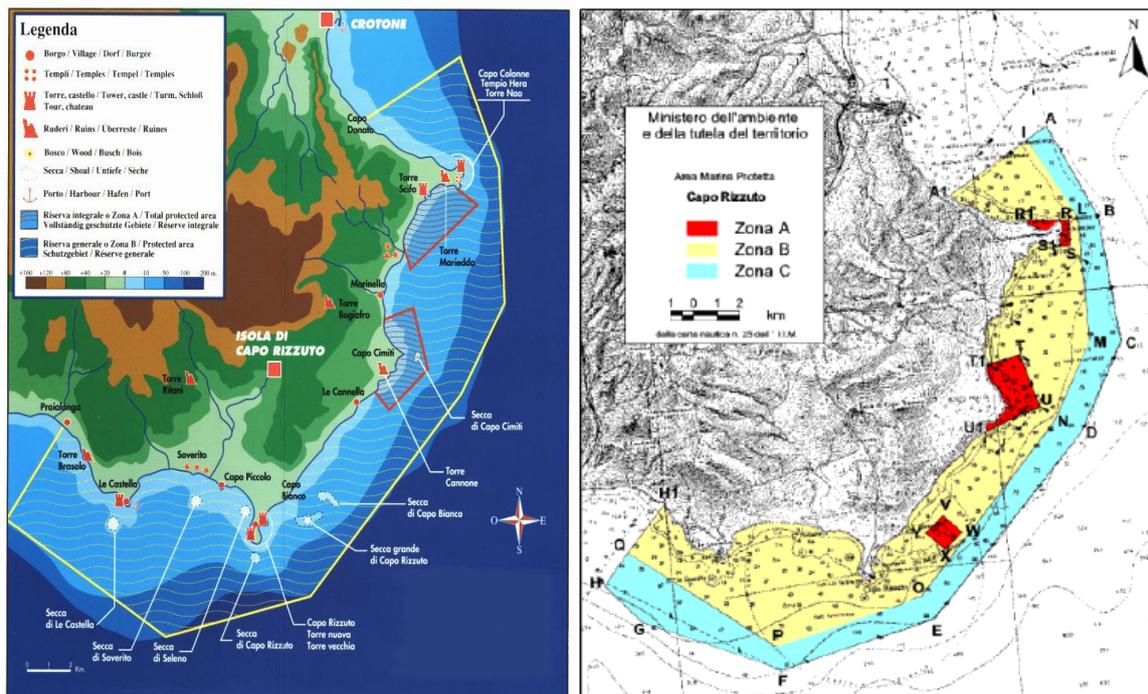


Fig. 9 - Cartografia e zonazione dell'AMP di Capo Rizzuto

Uno studio geomorfologico, eseguito a fini prettamente archeologici, ha chiarito alcuni eventi che hanno interessato l'area dell'antica Crotona, la cui estensione rappresentava tutto l'odierno Marchesato ed oltre. Ricerche di geoarcheologia, hanno messo in evidenza importanti mutamenti dell'ambiente naturale, da potersi collegare alle periodiche variazioni climatiche che hanno interessato il detto bacino.

Le scoperte di strutture archeologiche fisse sommerse dimostrano che l'abbassamento della linea di



Fig. 10 - Colonne di granito risalenti al III sec. d.C.,
rinvenute a Capo Cimiti

costa è un fenomeno antico nel bacino crotonese, strettamente collegato alle locali condizioni litologiche e tettoniche (Bertoni et al., 2000).

Ricerche subacquee, condotte lungo la costa crotonese tra Strangoli Marina e Le Castella (Guerrichio et al., 1997; Guerrichio et al., 2000) hanno consentito di individuare numerose strutture archeologiche fisse a profondità al momento comprese tra i 3 ed i 7-8 m. In particolare, nel fondale marino antistante il territorio de Le Castella

sono state individuate opere in laterizio (cisterne), una scalinata di un possibile approdo intagliata nelle calcareniti, parti di antiche cave consistenti in blocchi di arenarie già tagliati e pronti per essere estratti,

simili sotto tutti gli aspetti a quelli che si rinvenivano nelle cave della Magna Grecia a sud-est de Le Castella.

2.4 Geologia dei Campi Flegrei

Nel settore centrale della Piana Campana, ad ovest della città di Napoli è situato l'ampio complesso vulcanico dei Campi Flegrei, la cui attività vulcanica si è esplicita in seguito alle fasi tettoniche distensive plio-quadernarie che hanno portato alla formazione della stessa (Rittiman et al. 1950; Luongo et al., 1991).

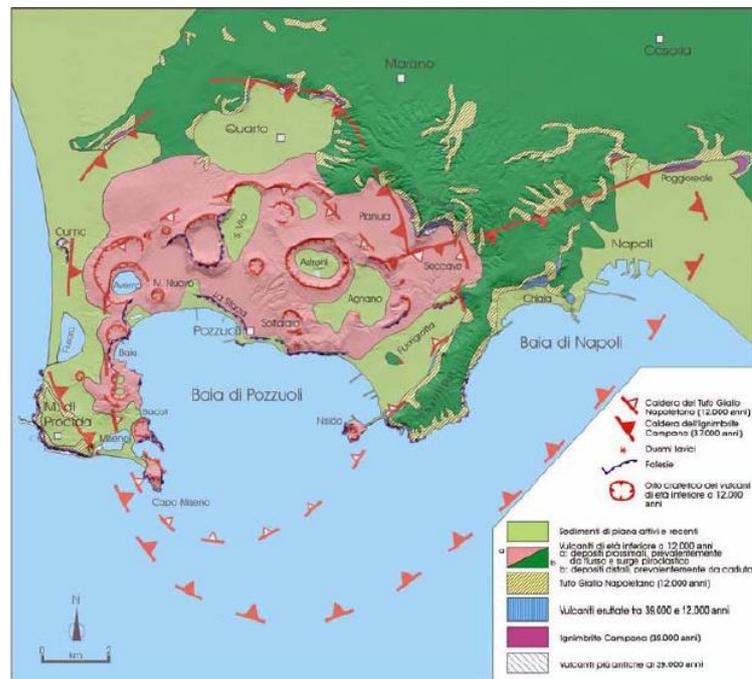


Fig. 11 - Carta geologica schematica dell'area napoletano-flegrea (modificata da Orsi et al., 1996)

I Campi Flegrei sono una regione di vulcanesimo attivo della Campania che comprende una parte di Napoli e il territorio che si trova a ovest della città fino a Cuma, includendo anche le isole di Procida, Ischia, e molti altri crateri sottomarini a sud-ovest del golfo di Napoli.

I Campi Flegrei, con Ischia e Procida, rappresentano un sistema vulcanico complesso formato da un insieme di piccoli apparati piroclastici monogenici, disposti secondo un allineamento est-ovest, che ha alimentato un'attività caratterizzata da un chimismo potassico ai limiti della saturazione.

La depressione strutturale dei Campi Flegrei è interpretata come indicativa di un collasso calderico: una grande depressione di forma subcircolare, prodotta durante grandi eruzioni dallo sprofondamento della struttura vulcanica. All'interno di questa depressione sono numerosi i crateri quadernari, molti dei quali attivi ed interessati da un'intensa attività tettonica.

L'area vulcanica dei Campi Flegrei, dal punto di vista strutturale, viene definita una zona di sprofondamento limitata da faglie i cui andamenti principali sono Nordovest-Sudest (direzione appenninica) lungo il bordo Nordest della piana e Nordest-Sudovest (direzione antiappenninica) lungo i bordi settentrionali e meridionali (Monte Massico e Monti Lattari).

Il bradisismo consiste in un movimento verticale del suolo che può manifestarsi con un innalzamento o uno sprofondamento (bradisismo negativo o positivo).

Questo sollevamento fu accompagnato da attività sismica con gli epicentri dei terremoti concentrati nella parte settentrionale della baia di Pozzuoli e nell'area tra Averno ed Agnano. Tra la metà del 1972 e la fine del 1974 il suolo si abbassò di 0,22 m, mentre, nei successivi otto anni non si rilevarono significativi movimenti verticali. Durante questo intervallo di tempo non vi fu attività sismica. All'inizio del 1982, cominciò una nuova fase di intenso sollevamento accompagnata da debole attività sismica fino alla fine dell'anno e dal 1983 alla fine del 1984, l'attività sismica fu molto intensa

L'antica città di Baia e l'isola della Gaiola in Napoli, sono siti tipici rappresentativi del fenomeno del bradisismo. La caldera dei Campi Flegrei, inclusi i siti di Baia e Gaiola, è la prima area al mondo dove il fenomeno del bradisismo è stato analizzato e descritto in profondità; ciò è dovuto alle scoperte archeologiche e geologiche che testimoniano il processo di “deformazione di lungo termine” del suolo. L'area costiera dei Campi Flegrei è un esempio unico di subsidenza dell'antica linea costiera, conseguenza delle modificazioni del territorio. Le particolari condizioni fisiche dovute alla subsidenza marina accentuano e coniugano, insieme, aspetti di grande interesse geologico, naturale e storico.

Quest'area è localizzata in un grande vulcano, la caldera dei Campi Flegrei, una struttura nata dal risultato di due dei maggiori episodi dell'antica caldera sprofondata, riferiti alle eruzioni della Campania Ignimbrite (39.000 anni a.C.) e del Tufo Giallo Napoletano (15.000 anni a.C.).

La caldera dei Campi Flegrei include l'area dei Campi Flegrei, la città di Napoli, la parte ovest della baia di Napoli e la baia di Pozzuoli fino a Campo Miseno. Ciò è dimostrato dal fatto che prima di 15.000 anni fa, le aree stavano all'esterno della caldera, mentre una subsidenza generale ha interessato l'area verso ovest della valle del Sebeto, l'area tra la costa di Posillipo e la piana di Agnano, e la costa tra l'Averno e Capo Miseno.

L'aspetto vulcanologico più saliente della zona occidentale dei Campi Flegrei è rappresentato da un allineamento di vulcani in direzione Nord-Nordovest, che comprende numerosi crateri tra cui Baia, Bacoli, Punta dell'Epitaffo, Porto Miseno e Capo Miseno.

Questi apparati di modeste dimensioni, quasi completamente distrutti dalla vulcano-tettonica e dall'erosione marina, sono costituiti da grosse scorie miste a pomici, immerse in una matrice cineritica talora resa coerente da un processo di zeolitizzazione secondario; in alcuni di questi

vulcani sono visibili infatti graduali passaggi verticali da facies gialla litoide a facies grigia meno coerente (Capo Miseno, Porto Miseno, Baia).

I vulcani di Fondi di Baia formati in una depressione, sono costituiti da due crateri, il più vecchio dei quali è quello più meridionale; i suoi prodotti sono in parte trasformati in tufo giallo a tessitura massiva e, nella parte più alta, senza soluzioni di continuità, passano a prodotti cineritici incoerenti dove sono immerse pomice a spigoli subarrotondati e frammenti di ossidiana.

Il secondo cratere, che è diviso dal primo da un palasuolo, è caratterizzato da prodotti ad andamento stratoide, costituiti da grosse pomice coriacee miste a ceneri cui si accompagnano frammenti di tufo giallo derivante dalla trapanazione del primo cratere.

Il golfo di Baia deve la sua forma ai resti di un orlo craterico perfettamente conservato nella parte occidentale; i suoi prodotti, affioranti con una certa continuità dalla zona di Punta dell'Epitaffio alle Terme Romane, vanno a sovrapporsi a quelli del secondo cratere di Fondi di Baia.

2.5 Geoarcheologia di Baia

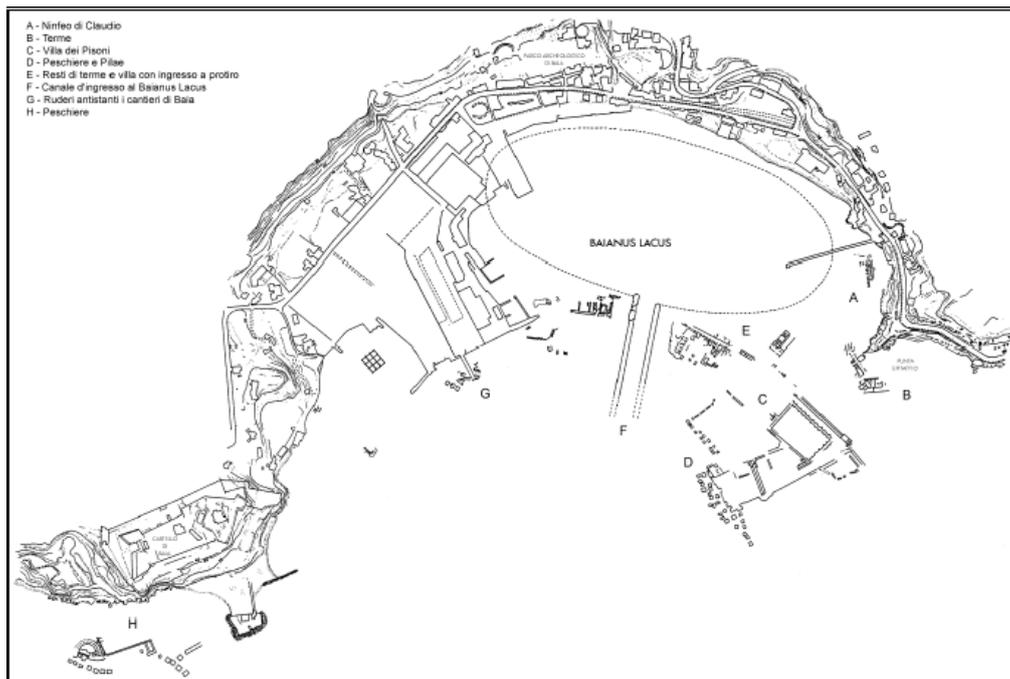
Le attività di ricerca di tipo subacqueo sono rivolte anche allo studio di zone di interesse archeologico che, originariamente poste sulla terraferma, sono attualmente sommerse a causa di sensibili alterazioni della conformazione costiera, avvenuta in seguito a movimenti eustatici, bradisismici.

A tal proposito è importante ricordare che sono molti i casi evidenti di strutture sommerse (es. la vasta area sommersa della città greca di Fanagoria, sulla costa orientale del Bosforo, Mar Nero) ma l'esempio più famoso e rappresentativo è certamente fornito dalla città sommersa di Baia (una delle più importanti stazioni termali di epoca romana), nel golfo di Napoli.

Il sito di Baia, a Bacoli (Napoli), conserva i resti di una città romana il cui insediamento può essere compreso tra il I secolo a.C. ed il V d.C.

La considerazione che aveva Baia a quei tempi era talmente elevata, che personaggi di spicco per l'epoca, come Silla, Caio Mario, Pompeo e Cesare vi soggiornavano, mentre Orazio ne cantava le lodi dicendo "Nullus in orbe sinus Bais praelucet amoenis" (Nessun altro luogo al mondo è più splendido del Golfo di Baia). Il golfo di Baia era anticamente occupato da un lago, il "Baianus Lacus", collegato al mare da un canale e circondato da edifici come il "Ninfeo Imperiale" e la "Villa dei Pisoni" (Camodeca G., 1987).

Questi edifici furono poi abbandonati in seguito ai frequenti fenomeni di bradisismo che portarono l'intera zona ad essere sommersa dal mare nel X secolo.



*Fig. 12 - Strutture sommerse ritrovate all'interno del golfo di Baia
in cui è stata riportata la locazione del "Baianus Lacus"*

L'area sommersa di Baia riserva grandi emozioni visive, data l'unicità del paesaggio subacqueo fortemente condizionato dai manufatti romani dispersi a varie profondità che costituiscono quasi tutto il substrato solido su cui vivono vari organismi animali e vegetali.

Il sito "Baia" è localizzato nell'area a sud dei Campi Flegrei, lungo l'area ovest interna della baia di Napoli. Il sito è posizionato a livello del mare, ad una distanza approssimativa di 15 Km ad ovest di Napoli. Il sito di Baia diventa Area Marina Protetta con decreto legge del 7 agosto 2002.

L'area protetta comprende tre zone:

- la zona A, che sta di fronte a Punta Epitaffio, soggetta a limitazione;
- la zona B, un'area protetta con generici vincoli;
- la zona C, sul lato orientale del parco, un'area protetta con parziali limitazioni.

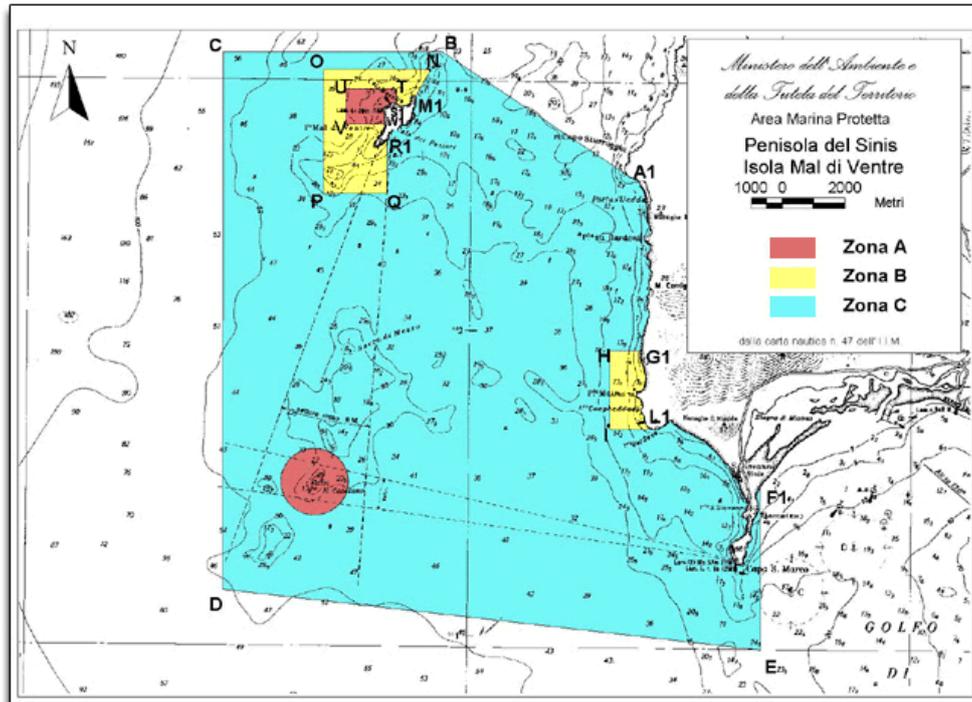


Fig. 13 - Zonazione dell'Area Marina Protetta di Baia

L'area di Baia va tutelata, quindi, per l'alto valore dei resti archeologici sommersi, i quali costituiscono l'evidenza monumentale emergente delle costruzioni situate in epoca romana lungo tutta l'antica fascia costiera dei Campi Flegrei.

CAPITOLO III

DIAGNOSTICA DEI MATERIALI

3.1 Introduzione

I campioni analizzati nel presente lavoro comprendono sia materiali lapidei naturali che artificiali. In particolare, sono stati analizzati sia reperti archeologici rinvenuti nell'Area Marina Protetta di Capo Rizzuto che litotipi naturali e artificiali di diversa tipologie e immersi in ambiente subacqueo in due diverse aree marine: Crotona e Baia.

Al fine di ottenere una completa caratterizzazione dei vari campioni è stato condotto un programma analitico integrato suddiviso in due parti.

La prima parte è stata incentrata sull'applicazione di analisi mineralogiche-petrografiche su sezioni sottili e stratigrafiche con osservazione a luce trasmessa, analisi allo stereomicroscopio e al microscopio elettronico a scansione (S.E.M.).

La seconda parte della ricerca si è avvalsa di una serie di analisi a carattere biologico finalizzate alla conoscenza della dinamica di colonizzazione e di degrado dei diversi provini lapidei. Precisamente sono state eseguite delle metodologie biologiche secondo NORMAL 19/85 seguite da allestimento di preparati biologici per l'osservazione al microscopio ottico (UNI 10923), allestimento di sezioni sottili e lucide di materiali lapidei colonizzati da biodeteriogeni (UNI 10922).

3.2 Metodologie analitiche

Per valutare le proprietà chimico-fisiche e mineralogico-petrografiche delle differenti tipologie di campioni è stata utilizzata una serie di tecniche analitiche differenti ma complementari tra di loro.

3.2.1 Caratterizzazione e allestimento dei provini prima dell'immersione

Al fine di valutare le forme di degrado provenienti da ambiente marino sono state preparate diverse serie di provini, immerse tutte nello stesso momento. Nell'area marina di Capo Rizzuto sono state

recuperate ad intervalli di 3 e 12 mesi di immersione. I provini del sito di Baia, costituiti unicamente da malte, sono stati invece recuperati dopo un anno di immersione.

Sui provini, realizzati con diversi litotipi, sono stati effettuati controlli periodici per rilevare l'entità ed il tipo di colonizzazione, valutando la qualità e la quantità degli organismi colonizzatori nel tempo.

I provini - comprendenti i seguenti litotipi: *Granito Silano* a grana fine ed a grana grossa (GF, GG), *Pietra di Mendicino* (M), *Pietra di Capo Colonna* a grana grossa ed a grana fine (KG, KF), *Pietra di S.Lucido* (SL), *Pietra di S.Giorgio* (SG), *Laterizio* (L), *Marmo di Carrara* (C) come riportato nella tabella sottostante - sono stati immersi in un'area ben definita della Riserva Marina Protetta di Capo Rizzuto, nota come Torre Scifo al largo di Capo Colonna, alla profondità di circa 6,5 metri.



Fig. 14 - Serie di provini preparata in laboratorio

TIPOLOGIA DI MATERIALE	SIGLA
Laterizio	L1, L2, L3, L4, L5, L6, LL1, LL2
Pietra di Mendicino	M1, M2, M3, M4, M5, M6, LM1, LM2
Pietra di Capo Colonna	KG1, KG2, KG3, KG4, KG5, KG6, KF1, KF2, KF3, KF4, KF5, KF6
Pietra di San Lucido	SL1, SL2, SL3, SL4, SL5, SL6
Pietra di San Giorgio	SG1, SG2, SG3, SG4, SG5, SG6
Marmo di Carrara	C1, C2, C3, C4, C5, C6, LC1, LC2
Granito Silano	GG1, GG2, GG3, GG4, GG5, GG6, GF1, GF2, GF3, GF4, GF5, GF6, LG1, LG2

Fig. 15 - Tabella riassuntiva dei materiali lapidei immersi nell'Area Marina Protetta di Capo Rizzuto

I provini lapidei sono stati ancorati su piastrelle di ceramica mediante malta di tipo idraulica in cui è stata aggiunta della pozzolana.

Sono state realizzate diverse serie di provini, numerate da 1 a 6, allo scopo di osservare la colonizzazione biologica per i diversi tempi di esposizione. Ogni serie naturalmente presentava la stessa tipologia di lapidei.

3.2.2 Allestimento di preparati biologici per l'osservazione al microscopio ottico

Le serie portate in superficie sono state subito poste in contenitori contenenti acqua di mare e, portate in laboratorio, si è provveduto alla fissazione della componente biologica presente sui provini. Si è effettuata una prima osservazione visiva allo scopo di prelevare porzioni di patine biologiche.

Una volta prelevati, i campioni di patine biologiche sono stati posti in provetta e fissati sia in formalina al 4%, sia in alcool etilico al 70%.

L'osservazione al microscopio ottico costituisce una fase fondamentale nello studio del biodeterioramento dei materiali lapidei. Permette di rilevare la presenza di biodeteriogeni, di osservarne le caratteristiche morfologiche e strutturali utilizzabili per la loro identificazione, nonché le relazioni con il substrato. Per l'allestimento dei preparati biologici si è tenuto conto della Normal UNI 10923.

3.3 Microscopia ottica

L'applicazione della microscopia ottica finalizzata allo studio dei materiali lapidei recanti diverse forme di alterazione e degrado ha avuto in questi ultimi tre decenni un notevole incremento in tutto il mondo (J. A. Larbi, 2004).

La microscopia ottica in luce trasmessa, infatti, costituisce un'importante tecnica di indagine scientifica nel campo della diagnostica e restauro dei Beni Culturali.

L'osservazione al microscopio ottico consente di rilevare la presenza di biodeteriogeni, le caratteristiche morfologiche e strutturali utili per la identificazione tassonomica, la profondità e le modalità di penetrazione.

Le osservazioni possono essere condotte su preparati a fresco, fissati o opportunamente colorati (Warscheid et al., 1990; UNI 10923, 2001). Per la verifica della profondità raggiunta dalle colonizzazioni microbiche nei materiali è utile l'allestimento e lo studio delle sezioni sottili del materiale.

Le osservazioni in sezioni sottili con il microscopio polarizzatore permettono di ottenere informazioni riguardo l'aderenza della patina al substrato, lo spessore e la morfologia, l'omogeneità ma soprattutto informazioni riguardo lo stato di conservazione del substrato su cui si trova (C. Vazquez-Calvo et.al. 2007).

3.4 Stereomicroscopio

Lo stereomicroscopio è uno strumento a bassi ingrandimenti che, in virtù dei due percorsi ottici separati ed inclinati tra loro, dà una visione stereotridimensionale del materiale da osservare.

Questo strumento risulta utile per indagare le caratteristiche morfologiche superficiali, per individuare la presenza di biodeteriogeni, verificarne la loro distribuzione e determinare le varie componenti dell'alterazione presenti sul campione.

Le osservazioni sono state fatte usando come stereomicroscopio un modello EMZ-5D e EMZ-5TRD.

3.5 Schedature dei provini

Le osservazioni condotte sui provini di materiali lapidei costituenti le diverse serie, immerse in ambiente marino, sono state riportate su schede, utilizzando il sistema SAMAS elaborato dall'ISCR.

Lo studio ha previsto l'elaborazione di due schede per la raccolta dei dati di carattere biologico, utili alla definizione dello stato di conservazione dei manufatti sommersi, precisamente SAMAS BIO I livello e SAMAS BIO II livello.

Le schede biologiche sono composte da due livelli, con approfondimento crescente, che riportano voci relative al tipo di alterazione biologica presente (micropitting, alveolizzazione, incrostazioni, patine, crescite algali, crescite di animali, crescite di piante superiori) alla frequenza e alla distribuzione dei diversi gruppi sistematici, sia animali che vegetali. Queste schede registrano densità e qualità delle colonizzazioni biologiche per la definizione della loro incidenza come fattore di degrado.

La compilazione delle schede può essere puntuale, limitata a un singolo rilevamento, o ripetuta a scadenze periodiche al fine di monitorare, in un arco di tempo stabilito, le variazioni della componente biotica colonizzatrice delle superficie indagate.



MINISTERO PER I BENI E LE ATTIVITA' CULTURALI
ISTITUTO CENTRALE PER IL RESTAURO
Nucleo per gli Interventi di Archeologia Subacquea
SCHEDE SAMAS BIO I LIVELLO



MINISTERO PER I BENI E LE ATTIVITA' CULTURALI
ISTITUTO CENTRALE PER IL RESTAURO
Nucleo per gli Interventi di Archeologia Subacquea
SCHEDE SAMAS BIO II LIVELLO

SCHEDA SAMAS N° SCHEDA SAMAS BIO I N° SCHEDA SAMAS BIO II N° DATA: COGNOME E NOME DEL COMPILATORE: DATI AMBIENTALI SUBACQUEI: Temperatura acqua: pH: DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA: si no OSSERVAZIONI:			
PRELIEVI DI MATERIALE BIOLOGICO: Tipo di prelievo: Localizzazione:		SI NO	
PRELIEVI DEL MATERIALE COSTITUTIVO: tipo di prelievo localizzazione		SI NO	
ANALISI di laboratorio:			
Porzione della struttura analizzata In mq	DANNI DI ORIGINE BIOLOGICA Micropitting <input type="checkbox"/> Alveolizzazione <input type="checkbox"/> Incrostazioni <input type="checkbox"/> Patine <input type="checkbox"/> Crescita di alghe <input type="checkbox"/> Crescita di animali <input type="checkbox"/> Crescita di piante superiori <input type="checkbox"/>	BASSA 1-30%	MEDIA 31-60%
		ALTA 61-100%	
Esposizione: Profondità:			

DATA SCHEDA N° SCHEDA SAMAS BIO I N° COGNOME E NOME DEL COMPILATORE: PORZIONE DELLA STRUTTURA ANALIZZATA: Inclinazione: PROFONDITÀ Esposizione: Superficie in m² DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA: si - riferimento:			
MICROPITTING Porfitei endolitici <input type="checkbox"/> Molluschi endolitici <input type="checkbox"/>	Diametro fori: Diametro fori: n° unità sup. Diametro fori: n° unità sup.	Diametro fori: Diametro fori: n° unità sup.	n° unità sup. n° unità sup.
ALVEOLIZZAZIONE Porfitei endolitici <input type="checkbox"/> Molluschi endolitici <input type="checkbox"/>			
INCROSTAZIONI Alghe incrostanti <input type="checkbox"/> Colore: Dimensioni: Spessore: N° Individui: Molluschi <input type="checkbox"/> Dimensioni: Spessore: N° Individui: Briozoi incrostanti <input type="checkbox"/> N° colonie: Altro <input type="checkbox"/>			
		Porfitei incrostanti <input type="checkbox"/> N° Individui o di colonie: Serpulidi <input type="checkbox"/> N° Individui: Antozoi <input type="checkbox"/> N° Individui:	
PATINE Alghe <input type="checkbox"/> Sup. coperta: Altro <input type="checkbox"/>			
CRESCITA DI ALGHE Forme filiformi <input type="checkbox"/> N° Individui/colonie: Forme filiformi <input type="checkbox"/> N° Individui/colonie: Forme arborescenti <input type="checkbox"/> N° Individui/colonie:			
		Cloroficee <input type="checkbox"/> Rodoficee <input type="checkbox"/> Feoficee <input type="checkbox"/> Cloroficee <input type="checkbox"/> Rodoficee <input type="checkbox"/> Feoficee <input type="checkbox"/> Cloroficee <input type="checkbox"/> Rodoficee <input type="checkbox"/> Feoficee <input type="checkbox"/>	
CRESCITE DI ANIMALI Briozoi <input type="checkbox"/> N° colonie: Tunicati <input type="checkbox"/> N° Individui: Porfitei <input type="checkbox"/> N° Individui:			
		Anellidi <input type="checkbox"/> N° Individui: Molluschi <input type="checkbox"/> N° Individui: Antozoi <input type="checkbox"/> N° Individui:	
CRESCITE DI PIANTE SUPERIORI Posidonia <input type="checkbox"/> Zoostera <input type="checkbox"/>			
		N° Esempi: N° Esempi:	
OSSERVAZIONI:			

Fig. 16 - Scheda SAMAS Bio I livello e scheda SAMAS Bio II livello

3.6 Microscopio elettronico a scansione (S.E.M.)

Nel settore dei Beni Culturali l'osservazione al S.E.M. permette di studiare la morfologia degli eventuali processi di degrado presenti sul materiale a maggiori ingrandimenti, permettendo così di individuare l'eventuale degrado fisico del materiale lapideo.

L'analisi S.E.M. è stata effettuata al fine di acquisire informazioni morfologiche dei vari campioni analizzati.

Le osservazioni sono state effettuate con il microscopio a scansione S.E.M. modello STEREOSCAN 360 della Cambridge Instruments, equipaggiato con un sistema di microanalisi a raggi X EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), modello EDAX della Philips Electronics, dotato di rilevatore a cristallo Si/Li - a finestra SUTW.

3.7 Analisi mineralogiche

L'analisi XRD è un'analisi basata sull'identificazione qualitativa e semiquantitativa delle principali fasi cristalline presenti in un campione per effetto dell'irraggiamento con raggi X.

Il principio base è la correlazione tra lo spettro della diffrazione X provocata dai piani cristallini delle sostanze e la natura chimico-cristallografica della sostanza.

Le analisi XRD sono state eseguite presso il Dipartimento di Scienze della Terra mediante diffrattometro, munito di goniometro verticale e operante in geometria $\theta - 2\theta$. Ciascun campione è stato preventivamente sottoposto ad una macinazione e, quindi, collocato nel porta campione mediante la tecnica del caricamento laterale, al fine di assicurare una disposizione casuale delle particelle evitando o comunque minimizzando, in tal modo, eventuali effetti di orientazione preferenziale.

Il diffrattometro automatico è dotato di due impianti di fluorescenza, uno dei quali rappresenta un modello tra i più avanzati disponibili sul mercato. Per le suddette analisi è stato usato il Bruker D8 ADVANCE.

Le condizioni con cui sono state raccolte le misure sono riportate nella tabella sottostante.

RANGE ANGOLARE	3° – 66°
PASSO DI SCANSIONE	0.0182°
TEMPO DI CONTEGGIO	0,14 sec
TENSIONE APPLICATA	40 KV
INTENSITÀ DI CORRENTE	40 mA
DURATA TOTALE DELLA RACCOLTA	0 h 08min 24sec

Fig. 17 - Tabella indicativa delle condizioni di misura con cui sono state effettuate le analisi diffrattometriche

I diffrattogrammi ottenuti sono stati quindi elaborati qualitativamente, in modo da potere individuare le fasi mineralogiche presenti in ciascuno dei campioni analizzati.

CAPITOLO IV

INDAGINI DIAGNOSTICHE APPLICATE A REPERTI ARCHEOLOGICI IMMERSI IN AMBIENTE MARINO

4.1 Studio dei reperti archeologici di Crotona

I reperti rinvenuti nell'area marina di Crotona e oggetto d'indagine sono rappresentati da diversi frammenti di ceramica e di marmo interessati da concrezioni e da patine superficiali.

Come prima indagine è stata effettuata la caratterizzazione biologica mediante osservazioni allo stereomicroscopio al fine di determinare la distribuzione della colonizzazione biologica. Successivamente sono state eseguite analisi morfologiche al S.E.M. per individuare le specie biologiche e per determinare le forme di degrado. Infine, mediante microscopia ottica in luce trasmessa, sono state studiate le relazioni tra il substrato e la crescita superficiale, definendo lo stato di conservazione del materiale lapideo.

4.1.1 Reperti archeologici analizzati

Una prima analisi eseguita sui reperti archeologici è stata di tipo macroscopico. Qui di seguito si riporta la tabella recante le diverse tipologie di reperti con le rispettive sigle.

Reperti di Marmo	Reperti di Biomicroite	Reperti di Laterizio	Reperto di Laterizio
MA1	A1	LB1	LA
MA2	A2	LB2	
MA3	A3	LB3	
	A4	LB4	
		LB5	
		LB6	
			

Fig. 18 - Tabella riassuntiva dei reperti archeologici rinvenuti nell'area marina di Crotona

4.2 Osservazioni allo stereomicroscopio

L'osservazione allo stereomicroscopio su ciascun campione è stata finalizzata alla determinazione delle caratteristiche morfologiche che interessavano la patina superficiale dei reperti.

In particolare, dalle osservazioni si è evinto che:

- i reperti ceramici (LB1, LB2, LB3, LB4, LB5, LB6, LA) presentavano sulle superficie delle forti concrezioni calcaree attribuibili a numerose alghe incrostanti, Serpulidi, Briozoi e Bivalvi. In alcuni frammenti si sono osservati fori di litodomi e numerosi fori tipici dell'azione di organismi perforanti;
- i reperti di marmo (MA1, MA2, MA3) presentavano numerosi fori prodotti da Spugne endolitiche e Molluschi, qualche Serpulide, fori di litodomi ed alghe incrostanti.
- i reperti di biomicrite (A1, A2, A3, A4) presentavano Briozoi e numerosi fori sia grandi che piccoli provocati da organismi endolitici.

La tabella sottostante riporta la sintesi relativa all'osservazione allo stereomicroscopio dove sono evidenziati i biodeteriogeni più frequenti e le forme di alterazione.

TIPOLOGIA DI CAMPIONE	SIGLA	PRINCIPALI BIODETERIOGENI	FORME DI ALTERAZIONE
MARMO	MA1	Alghe incrostanti	incrostazioni
MARMO	MA2	Alghe incrostanti	incrostazioni
MARMO	MA3	Alghe incrostanti	incrostazioni
BIOMICRITE	A1	Filamenti di Alghe rosse	incrostazioni
BIOMICRITE	A2	Spugne	incrostazioni
BIOMICRITE	A3	Briozoi e Spugne	incrostazioni
BIOMICRITE	A4	Briozoi	incrostazioni
LATERIZIO	LB1	Serpulidi, Alghe incrostanti	incrostazioni
LATERIZIO	LB2	Serpulidi, Alghe incrostanti	incrostazioni
LATERIZIO	LB3	Serpulidi, Alghe incrostanti	incrostazioni, patine
LATERIZIO	LB4	Alghe incrostanti	incrostazioni
LATERIZIO	LB5	Alghe incrostanti	incrostazioni
LATERIZIO	LB6	Alghe incrostanti	incrostazioni
LATERIZIO	LA	Serpulidi, Briozoi	incrostazioni

Fig. 19 - Tabella riassuntiva dei biodeteriogeni e forme di alterazione presenti sui reperti e osservate allo stereomicroscopio

Le osservazioni condotte allo stereomicroscopio su questi reperti sono documentate da fotografie (allegato A).

4.3 Analisi petrografica dei reperti

Al fine di ottenere una completa caratterizzazione dei materiali e del loro stato di conservazione sono state eseguite delle analisi minero-petrografiche condotte tramite microscopio ottico a luce trasmessa polarizzata. Le microfotografie sono state ottenute attraverso una macchina fotografica incorporata al microscopio. Le osservazioni sono state effettuate seguendo uno schema descrittivo largamente utilizzato nella letteratura scientifica. In particolare per i reperti ceramici è stata utilizzata la descrizione petrografica di Whitbread del 1995. Tale classificazione permette di considerare tutti i caratteri di un corpo ceramico e precisamente: microstrutture, pasta di fondo, inclusi, elementi a concentrazione tessiturale (Kcf) e porzioni amorfe di concentrazione (Acf).

4.3.1 Campione LB1

La ceramica in esame presenta un impasto a granulometria fine con pasta di fondo di colore rossiccio.

Dal punto di vista microstrutturale sono presenti vuoti che occupano circa il 15% e si dividono in: lineari, in alcuni casi paralleli alla superficie esterna, e buchi.

La distribuzione spaziale dei grani è variabile. In particolare, i granuli di medie dimensioni presentano una distribuzione da chiusa ad aperta, mentre quelli di piccole dimensioni vanno da chiusa a spazio singolo. La pasta di fondo omogenea, rossiccia otticamente attiva, presenta un'attività ottica bassa.

Dal punto di vista granulometrico gli inclusi hanno distribuzione polimodale e sono rappresentati da cristalli di quarzo sia arrotondato che spigoloso e quarzo policristallino. Sono evidenti, inoltre, ossidi opachi.

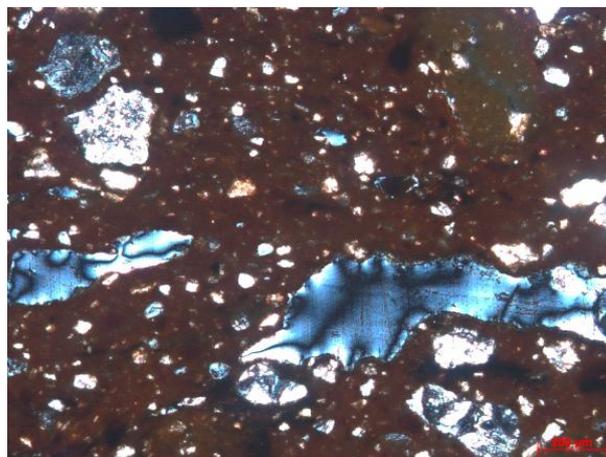


Fig. 20 - Pasta di fondo di colore rossiccio con inclusi.

4.3.2 Campione LB2

La ceramica in esame presenta un impasto a granulometria fine con pasta di fondo di colore brunastro. Dal punto di vista microstrutturale, è interessata da diverse tipologie di vuoti (precisamente: buchi di dimensioni medio/piccole, vuoti lineari e vescicole).

La distribuzione spaziale dei grani è variabile. In particolare, i grani grossolani hanno una distribuzione da aperta a spazio singolo, mentre quelli più piccoli hanno una distribuzione da chiusa a spazio singolo.

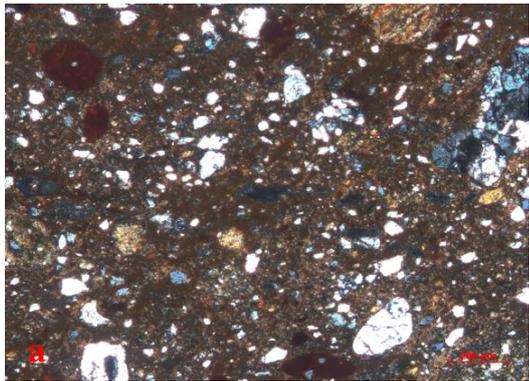


Fig. 21 - Pasta di fondo di colore brunastro con inclusi

La pasta di fondo omogenea presenta attività ottica media. La b-fabric dei domini otticamente attivi è screziata. Dal punto di vista granulometrico gli inclusi hanno distribuzione polimodale mentre la classazione è media, infatti sono presenti grani arrotondati e subangolosi.

Gli inclusi sono rappresentati da quarzo, frammenti di cocchiopesto (1:2) e frammenti di calcite.

Dal punto di vista del degrado è presente una patina discontinua, omogenea e con spessore variabile compreso tra 50 e 400µm.

4.3.3 Campione LB3

La ceramica in esame presenta un impasto a granulometria fine con pasta di fondo di colore rossiccio.

Dal punto di vista microstrutturale sono presenti vuoti (prevalenti quelli lineari).

La distribuzione spaziale dei granuli va da chiusa ad aperta.

La pasta di fondo è omogenea mentre l'attività ottica è bassa.

Dal punto di vista granulometrico gli inclusi hanno distribuzione polimodale e sono rappresentati da un frammento di cocchiopesto e da uno di quarzo policristallino. Sono, inoltre, presenti ossidi opachi.

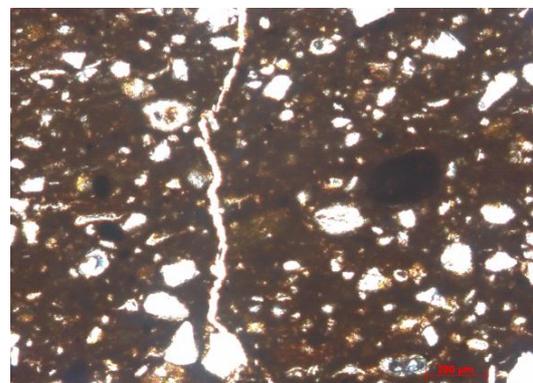


Fig. 22 - Pasta di fondo di colore rossiccio con inclusi e fratturazione

4.3.4 Campione LB4

Il campione in esame è una ceramica, caratterizzata da un impasto medio/fine ed una pasta di fondo (matrice) di colore rossiccio. Dal punto di vista microstrutturale, sono presenti comuni vuoti, circa il

10%, classificabili come lineari, vescicole, di forma regolare, e buchi di forma irregolare di medie dimensioni.

Il rapporto matrice–inclusi è di 40:60. La distribuzione dei granuli è variabile. In particolare, i granuli di dimensioni medio/grandi presentano una distribuzione da aperta a chiusa, mentre quelli di piccole dimensioni vanno da spazio aperto a singolo. La pasta di fondo è omogenea ed otticamente inattiva. La distribuzione granulometrica degli inclusi è polimodale mentre la classazione è scarsa. Gli inclusi sono rappresentati nella quasi totalità da cristalli di quarzo (un solo frammento è quarzo policristallino). V'è presenza di Acf.

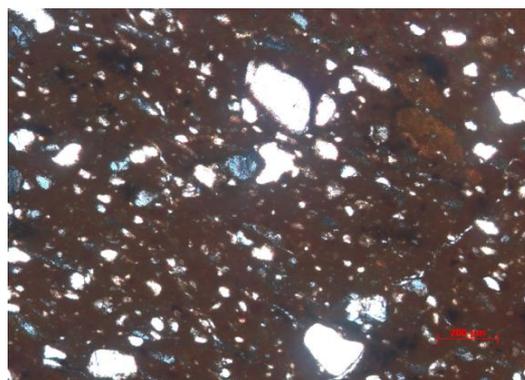


Fig. 23 - Pasta di fondo di colore rossiccio con inclusi

4.3.5 Campione LB5

Il campione in esame è una ceramica, caratterizzata da un impasto medio/ fine ed una pasta di fondo (matrice) di colore bruno-rossiccio.

Dal punto di vista microstrutturale sono presenti comuni vuoti, classificabili come lineari, paralleli alla superficie esterna, e vescicole. Il rapporto matrice–inclusi è di 40:60.

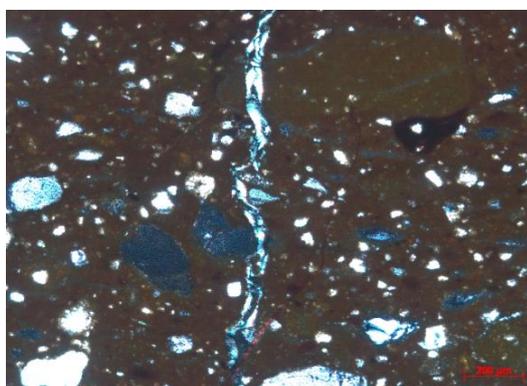


Fig. 24 - Pasta di fondo di colore bruno-rossiccio con inclusi

La distribuzione dei granuli è variabile. In particolare, i granuli di dimensioni medio/grandi presentano distribuzione spaziale dei granuli da chiusi ad aperti, mentre quelli di dimensioni minori hanno una distribuzione che va da spazio singolo ad aperto. La pasta di fondo è omogenea, con attività ottica bassa solo in alcune porzioni.

La distribuzione granulometrica è polimodale mentre la classazione è media.

Il rapporto matrice/incluso è circa di 40:60. Gli inclusi sono rappresentati da quarzo, frammenti di cocciopesto e frammenti di quarzo policristallino.

4.3.6 Campione LB6

Il campione in esame è una ceramica, caratterizzata da un impasto medio/fine ed una pasta di fondo (matrice) di colore bruno-rossiccio.

Dal punto di vista microstrutturale sono presenti comuni vuoti classificabili come lineari, vescicole, buchi. La distribuzione dei granuli va da chiusa a spazio singolo.

La pasta di fondo è bruno/chiera, otticamente attiva, con attività ottica media.

Gli inclusi sono rappresentati da cristalli di quarzo con classazione media. Presentano, infatti, forme da sub-arrotondato ed angolose.

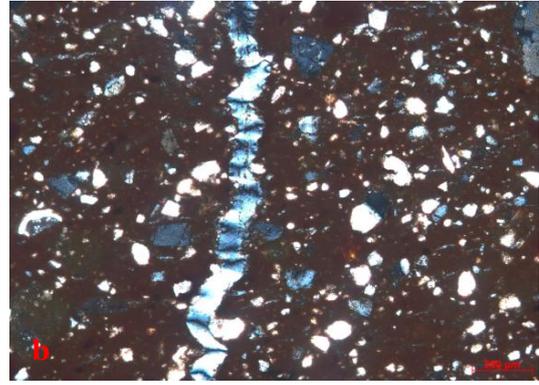
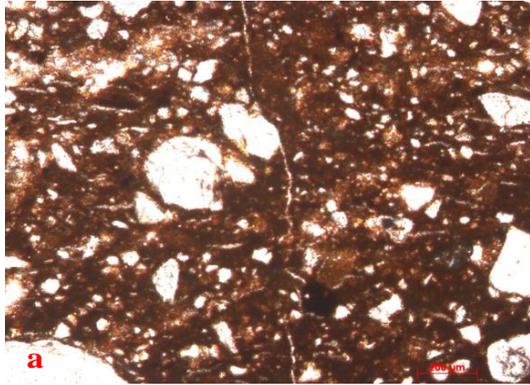


Fig. 25 - (a,b) Pasta di fondo di colore bruno-rossiccio con inclusi

4.3.7 Campione LA

Il campione in esame è una ceramica, caratterizzata da un impasto fine ed una pasta di fondo (matrice) di colore bruno-rossiccio.

Dal punto di vista microstrutturale sono presenti comuni vuoti classificabili come lineari (che sono quelli prevalenti) e buchi. La distribuzione spaziale dei granuli va da chiusa a spazio doppio.

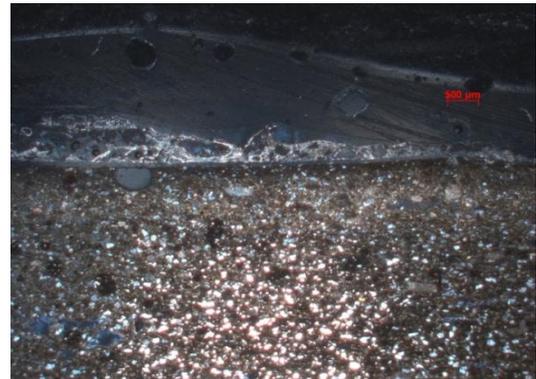


Fig. 26 - Pasta di fondo di colore bruno-rossiccio con patina

4.3.8 Campione MA1

Il campione in esame è un marmo costituito da cristalli di calcite con tessitura eteroblastica, caratterizzata, in alcune porzioni, da punti tripli a circa 120 gradi. Facendo una stima del MGS (maximum grane size) risulta che le dimensioni massime della calcite sono intorno a 1 mm.

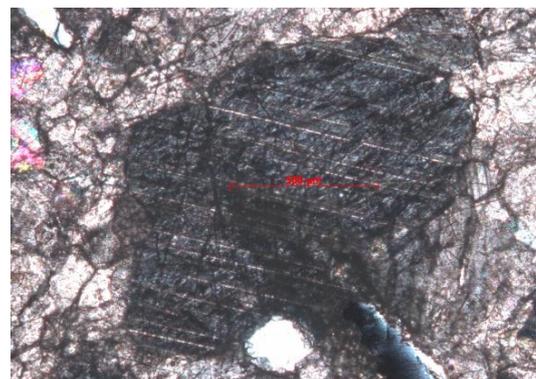


Fig. 27 - Cristallo di calcite

4.3.9 Campione MA2

Il campione in esame è un marmo, costituito da cristalli di calcite con tessitura eteroblastica. In alcune posizioni sono visibili punti tripli a circa 120 gradi.

Facendo una stima del MGS (maximum grane size), risulta che le dimensioni massime della calcite sono intorno a 0,8 mm.

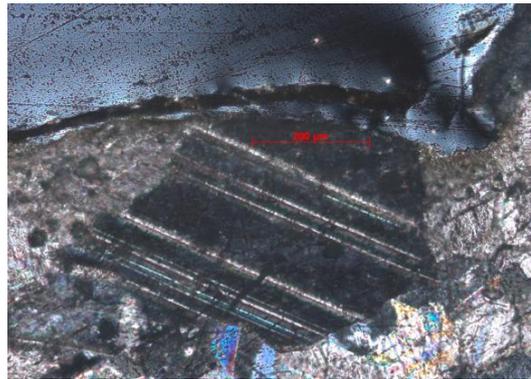


Fig. 28 - Cristallo di calcite

4.3.10 Campione MA3

Il campione in esame è un marmo costituito prevalentemente da cristalli di calcite, con struttura eteroblastica. In alcuni casi, sono molto evidenti i punti tripli della calcite.

Facendo una stima del MGS (maximum grane size) risulta che le dimensioni massime della calcite sono intorno a 1,3 mm.

4.3.11 Campioni A1-A2-A3-A4

I campioni in esame in seguito all'analisi petrografica possono essere classificati come delle biomicrite di colore rossastro (Folk, 1959).

4.4 Analisi mineralogica di reperti

Per quanto concerne i reperti, le analisi mineralogiche sono state eseguite sul substrato.

4.4.1 Analisi diffrattometriche del substrato

Le analisi diffrattometriche realizzate sul substrato dei reperti di laterizio della serie LB hanno evidenziato una composizione mineralogica caratterizzata dalla presenza di quarzo, fatta eccezione per un solo reperto che è caratterizzato dalla presenza oltre che di quarzo, di calcite e diopside.

La presenza del diopside, che è una fase di neoformazione, indicano che le T di cottura raggiunte da tale reperto sono state superiori a 850° C, ed inoltre confermano che l'argilla di partenza è più ricca in tenori di calcio.

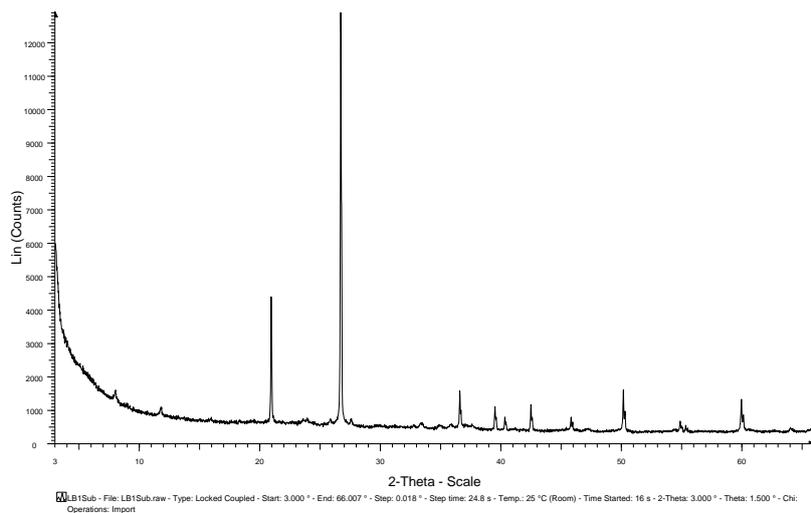


Fig. 29 - Diffrattogramma del corpo ceramico dei reperti della serie LB

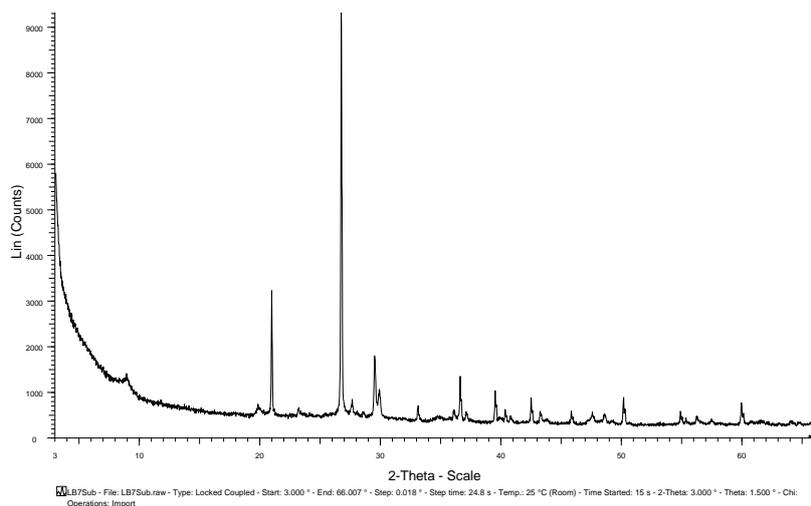


Fig. 30 - Diffrattogramma del reperto con il corpo ceramico caratterizzato da un'argilla di partenza ricca in calcio

4.5 Osservazioni al microscopio elettronico a scansione (S.E.M.)

Dall'osservazione al Microscopio elettronico a scansione (S.E.M.) è stato possibile evidenziare che per quanto riguarda la tipologia di laterizio, rappresentata da numerosi reperti (LA, LB1, LB2, LB3, LB4, LB5, LB6) si è potuto notare a maggiore ingrandimento i biodeteriogeni osservati allo stereomicroscopio. Si è notato, soprattutto, la presenza di spicole (si tratta di particolari strutture microscopiche, costituite da carbonato di calcio che fungono da sostegno del corpo molle delle spugne) e impronte provocate da organismi endolitici (in alcuni reperti si è visto la presenza di microboring).

Anche i reperti che rappresentavano il marmo (MA1, MA2, MA3), presentavano in prevalenza numerose spicole seguite da qualche impronte e qualche tallo algale incrostante.

I reperti di biomicrite (A1, A2, A3, A4) presentavano in prevalenza alghe incrostanti, seguite da impronte e qualche spicola. In alcuni punti erano presenti anche serpulidi ma in quantità ridotte. In un solo reperto è stata rilevata la presenza del microboring (completamente assente negli altri).

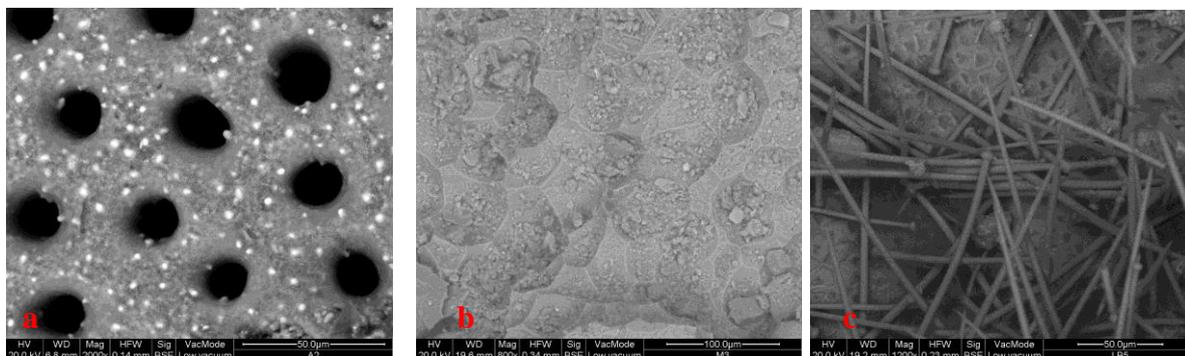


Fig. 31 – (a) Microboring, (b) Impronte, (c) Spicole

Le osservazioni fatte al S.E.M. sono documentate da fotografie (allegato B).

4.6 Analisi del degrado dei reperti

4.6.1 Campione LB1

Dal punto di vista del degrado è presente una patina disomogenea che si sviluppa su due lati del reperto e presenta spessore variabile (da un lato è compreso tra 2 e 4mm e dall'altro tra 300 μ m e 2mm). In alcune porzioni della patina sono presenti piccole compenetrazioni ed in alcune zone è evidente la presenza di quarzo sia come singolo cristallo che come quarzo policristallino derivante dal substrato.

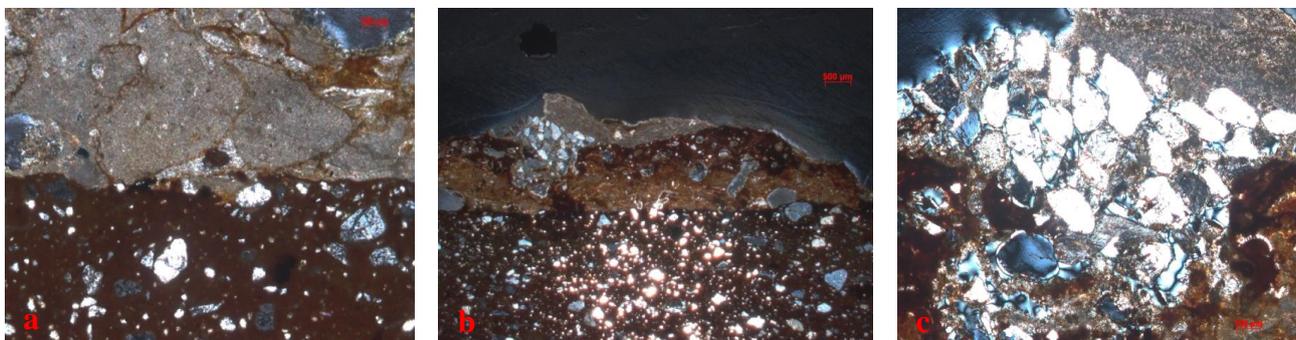


Fig. 32 - (a) interfaccia substrato-patina con compenetrazioni; (b,c) patina disomogenea con inclusi di quarzo a cristalli singoli e policristallino

4.6.2 Campione LB2

Dal punto di vista della conservazione sono evidenti sacche di compenetrazione e diversi sistemi di fatturazione probabilmente legati allo sviluppo della patina.

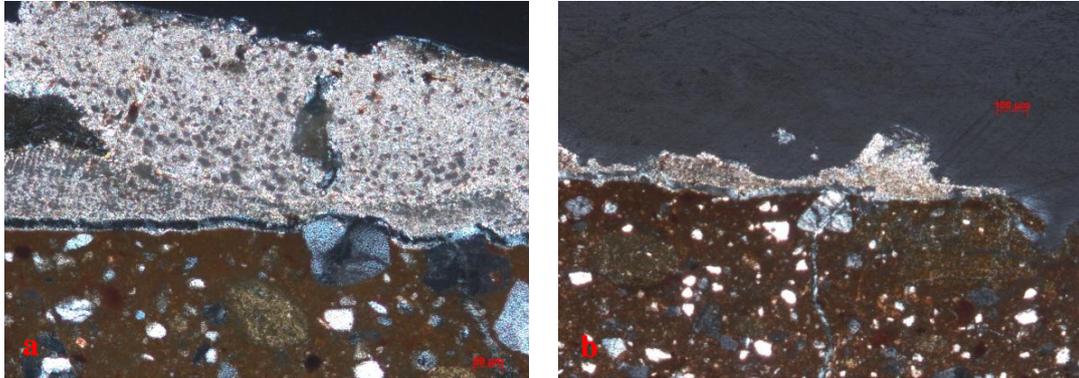


Fig. 33 - (a) interfaccia substrato-patina con compenetrazioni; (b) sistemi di fatturazione legati allo sviluppo della patina

4.6.3 Campione LB3

Dal punto di vista del degrado è presente una patina su tre lati del campione. Su un lato presenta uno spessore minore compreso tra 200 µm e 1,5 mm e su un altro lato raggiunge uno spessore compreso tra 300 µm e 5,5 mm. All'interno della patina sono evidenti inoltre inclusi di quarzo.

Dal punto di vista della conservazione sono evidenti diversi sistemi di fratture parallele probabilmente legati allo sviluppo della patina.

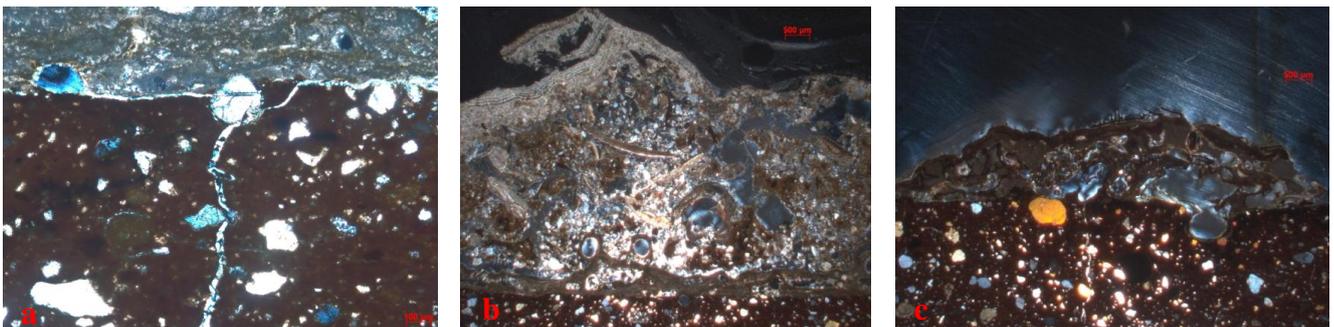


Fig. 34 - (a) interfaccia substrato-patina con compenetrazioni e frattura; (b,c) patina disomogenea con inclusi di quarzo

4.6.4 Campione LB4

Dal punto di vista del degrado è presente sulla superficie del campione una patina. Quest'ultima si presenta continua e disomogenea. Sono evidenti diverse zone in cui si ha una penetrazione all'interno del substrato. La patina ha uno spessore variabile che raggiunge in un lato anche 6mm (minimo 600

μm). Dal punto di vista della conservazione sono evidenti diversi sistemi di fratturazione probabilmente legati allo sviluppo della patina.

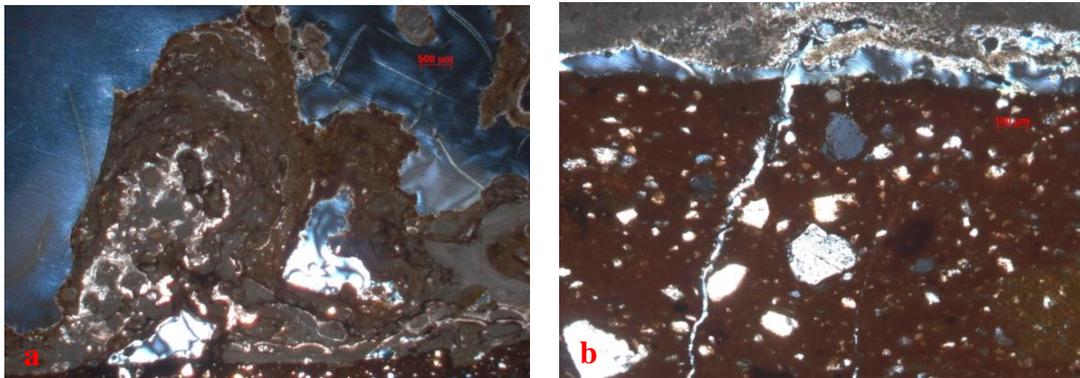


Fig. 35 - (a) patina disomogenea con inclusi di quarzo; (b) sistemi di fratturazione legati allo sviluppo della patina

4.6.5 Campione LB5

Dal punto di vista del degrado è presente sulla superficie del campione una patina. Quest'ultima si presenta continua ed omogenea con uno spessore variabile compreso tra $600\mu\text{m}$ e $1,5\text{mm}$ (in alcune zone raggiunge anche 1cm di spessore). Inoltre, sono evidenti diverse zone con penetrazioni all'interno del substrato. Probabilmente, la presenza della patina ha determinato una serie di fratture pervasive parallele tra di loro.

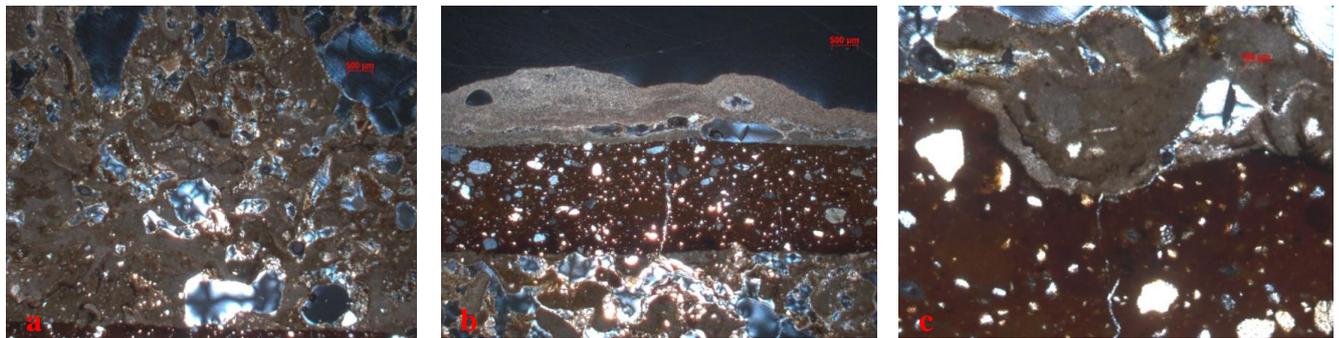


Fig. 36 - (a, b) patina sui lati del reperto con fratturazione; (c) compenetrazioni e sistemi di fratturazione

4.6.6 Campione LB6

Dal punto di vista del degrado è presente sulla superficie del campione una patina. E' evidente come la patina abbia disgregato il substrato su cui si è sviluppata creando una frattura di diametro compreso tra 1 e 2mm . Sono presenti, inoltre, diversi sistemi di fratturazione.

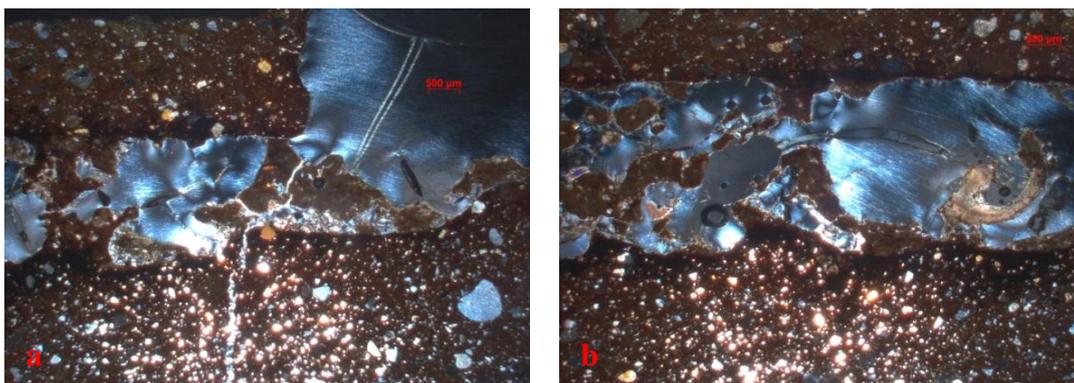


Fig. 37 - (a,b) patina del reparto compenetrato nel substrato e che ha determinato fratturazioni

4.6.7 Campione LA

Dal punto di vista del degrado è presente sulla superficie del campione una patina discontinua, omogenea e con spessore compreso tra 100 e 600 μm . In alcune porzioni della patina sono presenti piccole compenetrazioni nel substrato.

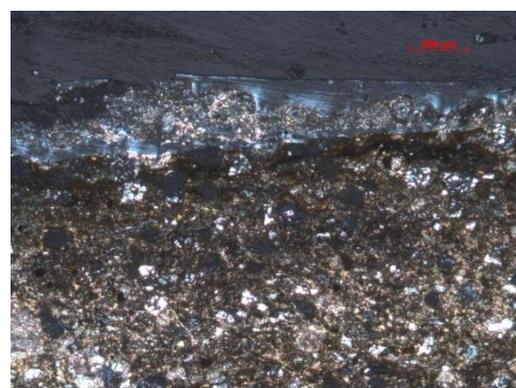


Fig. 38 - Particolare patina con compenetrazioni

4.6.8 Campione MA2

Sulla superficie del campione è evidente la presenza di una patina abbastanza omogenea, discontinua e dallo spessore compreso tra 20 e 50 μm . Dal punto di vista morfologico segue il substrato e in alcune porzioni determina delle compenetrazioni all'interno del substrato fino a 0,1 mm.

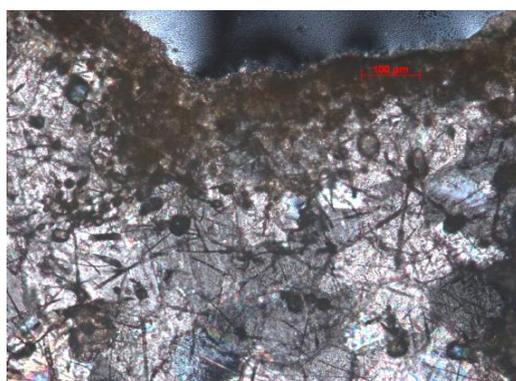


Fig. 39 - Patina e compenetrazioni

4.6.9 Campione MA3

Dal punto di vista dello stato di conservazione è presente una patina che segue la morfologia del substrato. Essa si presenta continua ed omogenea, con uno spessore compreso tra 200 e 800 μm . In alcuni casi è possibile apprezzare delle sacche di compenetrazione all'interno del substrato che penetrano in alcuni punti fino a 1,5 mm.

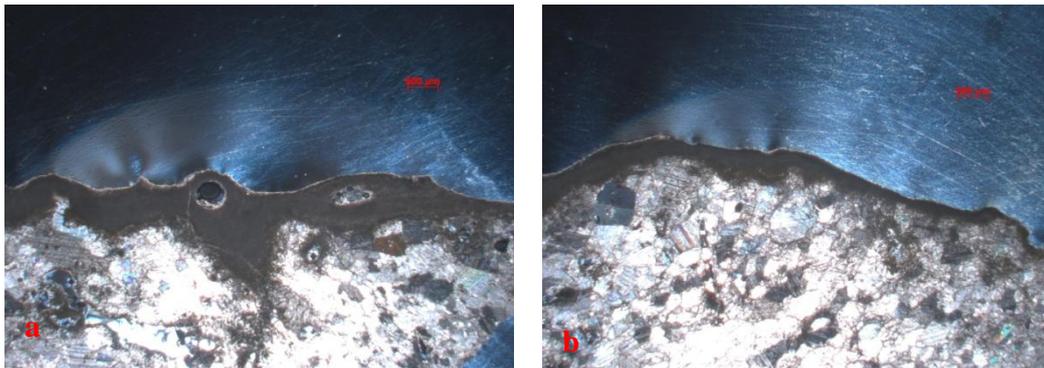


Fig. 40 - (a,b) Patina con evidenti sacche di compenetrazione

4.6.10 Campione A1

Dal punto di vista del degrado il reperto è interessato su due lati da una patina ben evidente, continua, omogenea, ben compenetrata con il substrato e con un ampio spessore che raggiunge il valore di 1cm (valore minimo 1mm). La patina si presenta irregolare e non compatta e penetra all'interno del substrato disgregandolo.

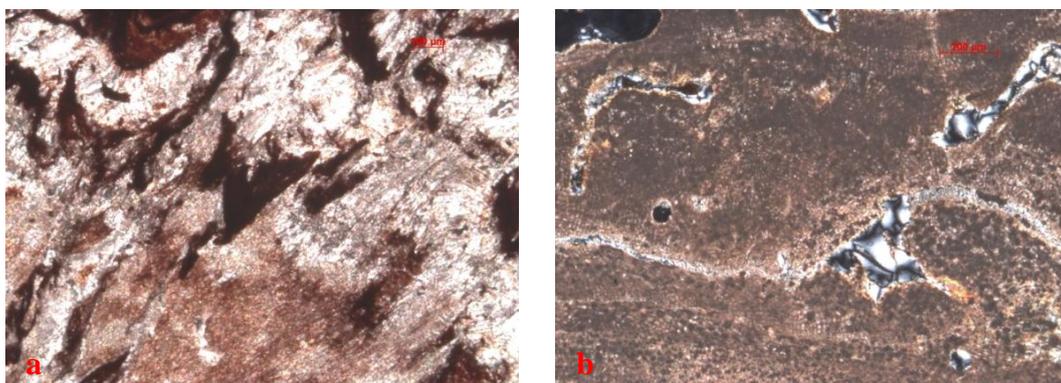


Fig. 41 - (a) Patina con evidenti compenetrazioni con il substrato; (b) particolare patina

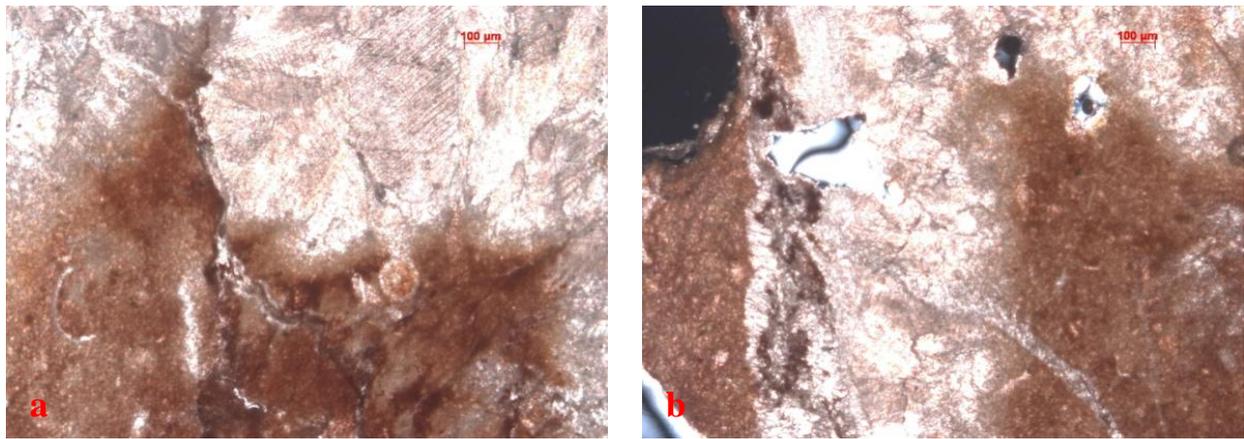


Fig. 42 - (a) Patina con evidenti compenetrazioni con il substrato; (b) particolare patina compenetrata con fratture riempite da calcite

4.6.11 Campione A2

Dal punto di vista del degrado il reperto è interessato da una patina ben evidente, ben compenetrata con il substrato e con un ampio spessore che raggiunge il valore di 1cm (valore minimo 1mm). La patina si presenta irregolare e abbastanza compatta e penetrando all'interno del substrato lo disgrega. La patina determina all'interno del substrato delle fratture in cui è evidente la presenza di cristalli di calcite.

4.6.12 Campione A3

Dal punto di vista del degrado il reperto è interessato su di un lato da una patina ben evidente, compenetrata con il substrato e con uno spessore compreso tra 1 e 4mm. La patina si presenta abbastanza compatta, quest'ultima provoca delle fratture nel substrato in cui è evidente la presenza di cristalli di calcite. In altri punti sono evidenti delle disgregazioni superficiali.

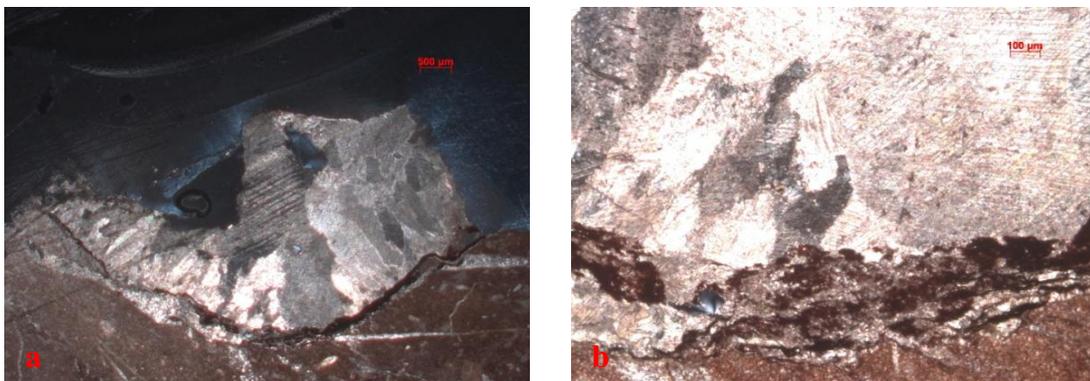


Fig. 43 - (a) Patina con evidenti compenetrazioni con il substrato; (b) particolare patina

4.6.13 Campione A4

Dal punto di vista del degrado il reperto è interessato da una patina ben evidente, continua, disomogenea e con uno spessore compreso tra 2 e 4 mm. La patina si presenta abbastanza compatta e penetra all'interno del substrato determinando delle disgregazioni. Determina, inoltre all'interno del substrato delle fratture in cui è evidente la presenza di cristalli di calcite.

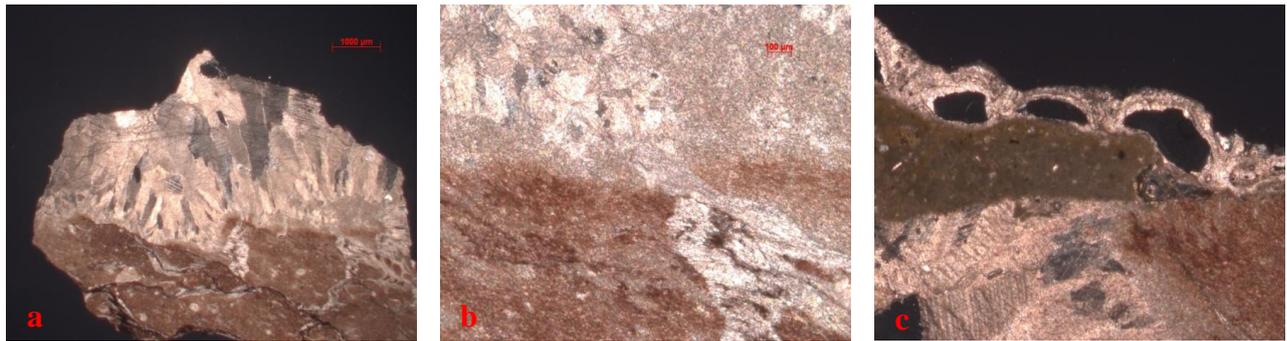


Fig 44 – (a, b) Patina con evidenti compenetrazioni con il substrato e fratture riempite di calcite; (c) particolare patina disomogenea all'interfaccia con il substrato

4.7 Analisi mineralogica di reperti

Per quanto concerne i reperti le analisi mineralogiche sono state eseguite sulla crosta superficiale.

4.7.1 Analisi diffrattometriche delle croste

Le analisi diffrattometriche realizzate sulle croste dei reperti di laterizio della serie LB hanno evidenziato una composizione mineralogica caratterizzata dalla presenza di quarzo e calcite.

Ciò rivela la natura carbonatica delle patine presenti sui reperti, mentre la presenza di quarzo deriva probabilmente dagli inclusi del corpo ceramico, fenomeno già evidenziato dalle indagini al microscopio ottico.

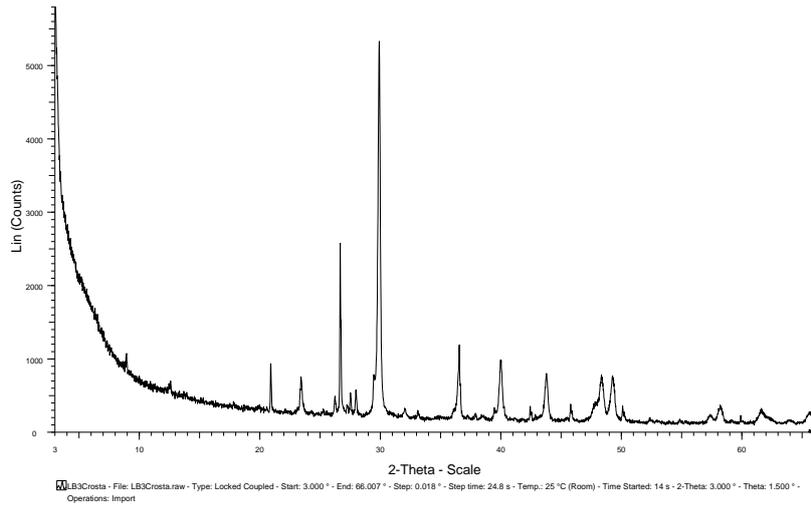


Fig. 45 - Diffratogramma della crosta dei reperti della serie LB

4.8 Considerazioni conclusive

I meccanismi di degrado sui reperti ceramici sommersi comprendono fenomeni di diversa natura. Lo studio dei reperti ha portato ad identificare in prevalenza un danno di natura fisica dovuta all'azione meccanica esercitata sul substrato dallo sviluppo degli organismi ed alla penetrazione di strutture vegetative animali o vegetali o di porzioni di tallo aventi, nel caso delle alghe, funzione di ancoraggio (Fletcher, 1998).

Le osservazioni condotte sui reperti archeologici hanno evidenziato che la colonizzazione dei biodeteriogeni quali Bivalvi, Serpulidi, Spugne, Alghe incrostanti, variava qualitativamente e soprattutto quantitativamente in base al natura del substrato.

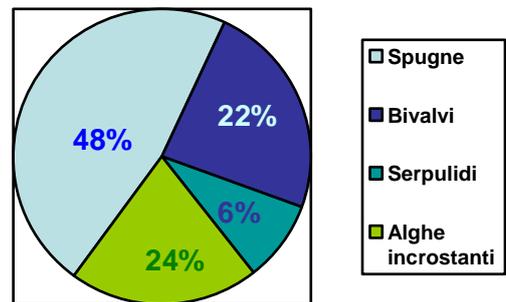


Fig. 46 - Percentuali degli organismi riscontrati sui reperti

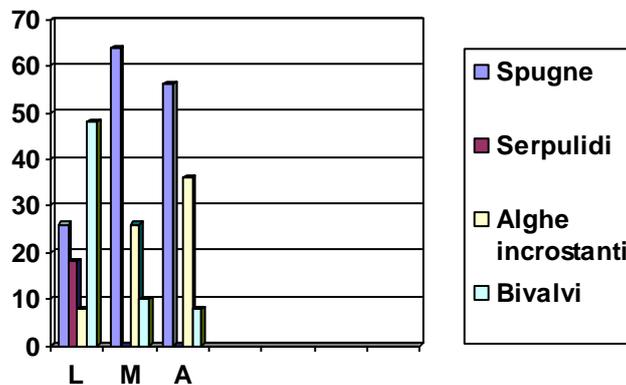


Fig. 47 - Diagramma della distribuzione degli organismi sui materiali lapidei

La diversità più evidente è risultata legata al diverso sviluppo di organismi endolitici, che presentavano variazioni in base al substrato. Infatti, come si vede, le spugne attaccano maggiormente il marmo rispetto alla biomicrite e il laterizio.

Particolarmente invasivo è risultato lo sviluppo dello zoobentos con i suoi diversi gruppi sistematici tra i quali il Phylum Porifera (Spugne) e Serpulidi (Policheti Sedentari).

Dallo studio dei reperti si evincono le seguenti considerazioni:

- le concrezioni calcaree presenti sui reperti stessi sono attribuibili ad organismi epilittici;
- i microboring sono attribuibili ad organismi endolitici;
- la presenza di forme endolitiche è da attribuire al Phylum Porifera (Spugne) ed, in particolare, a quelli riconducibili al genere *Cliona*.

Inoltre, le osservazioni al S.E.M. hanno evidenziato con maggiore dettaglio la morfologia dei fori presenti sui diversi reperti e hanno permesso l'osservazione dell'ultrastruttura delle spicole silice (in particolare quelle riconducibili al genere *Cliona*, che ha svolto un ruolo importante nei processi di degrado dei reperti). Il genere *Cliona*, essendo endolitico, produce all'interno del materiale calcareo cavità che alterano i reperti, visibili all'esterno sotto forma di micropitting.

CAPITOLO V

INDAGINI DIAGNOSTICHE APPLICATE A PROVINI LAPIDEI IMMERSI IN AMBIENTE MARINO

5.1 Caso studio: Capo Colonna, Riserva Naturale Marina Protetta di Capo Rizzuto

Al fine di valutare le forme di degrado sui campioni provenienti dall'ambiente marino di Capo Colonna, sono state preparate diverse serie di provini, immerse tutte nello stesso momento e recuperate in due tranches: dopo 3 e dopo 12 mesi di immersione.



Fig 48 - Provini immersi nel fondale marino di Capo Colonna (Crotone)

Dopo i mesi di esposizione in ambiente marino, i provini sono stati recuperati ed immediatamente analizzati secondo la seguente procedura: osservazioni biologiche su campioni appena recuperati e analisi petrografiche su sezioni stratigrafiche dei campioni stessi..

5.1.1 Caratterizzazione e preparazione dei provini prima dell'immersione

Per caratterizzare dal punto di vista mineralogico-petrografico i provini, sono state allestite delle sezioni sottili, osservate al microscopio mineralogico.

I provini sono stati realizzati con 7 litotipi: *Granito Silano* a grana fine ed a grana grossa (GF, GG), *Pietra di Mendicino* (M), *Pietra di Capo Colonna* a grana grossa ed a grana fine (KG, KF), *Pietra di S.Lucido* (SL), *Pietra di S.Giorgio* (SG), *Laterizio* (L), *Marmo di Carrara* (C) come riportato nella tabella sottostante.

TIPOLOGIA DI MATERIALE	SIGLA
Laterizio	L1, L2, L3, L4, L5, L6, LL1, LL2
Pietra di Mendicino	M1, M2, M3, M4, M5, M6, LM1, LM2
Pietra di Capo Colonna	KG1, KG2, KG3, KG4, KG5, KG6, KF1, KF2, KF3, KF4, KF5, KF6
Pietra di San Lucido	SL1, SL2, SL3, SL4, SL5, SL6
Pietra di San Giorgio	SG1, SG2, SG3, SG4, SG5, SG6
Marmo di Carrara	C1, C2, C3, C4, C5, C6, LC1, LC2
Granito Silano	GG1, GG2, GG3, GG4, GG5, GG6, GF1, GF2, GF3, GF4, GF5, GF6, LG1, LG2

Fig. 49 - Litotipi immersi nell'Area Marina di Crotona

5.2 Analisi petrografica dei campioni immersi nell'Area Marina di Crotona

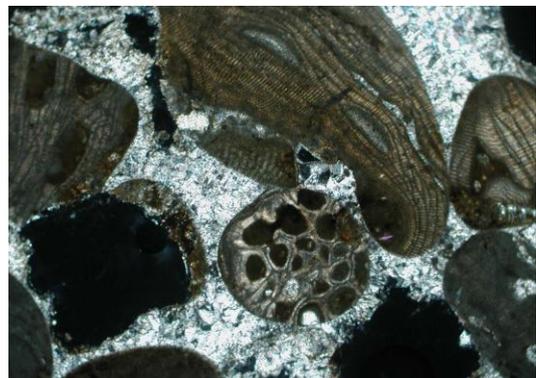
5.2.1 Campione KG

La struttura della sezione del campione KG si presenta eterogenea con una tessitura granosostenuta. Gli allochimici presenti sono rappresentati da bioclasti di alghe calcaree (che costituiscono la percentuale maggiormente presente nel campione), briozi (Fig. 50) e spine di echinidi. Si riconoscono altri clasti quali peloidi, quarzo, plagioclasio e litoclasti.

Il cemento è di natura spiritica. L'intera sezione è interessata da una porosità media dovuta sia a

dissoluzione degli originali componenti allochimici che a fenomeni di disgregazione.

Dalle caratteristiche rilevate il campione lo si può classificare come una Biosparite (Folk 1959).



*Fig. 50 - Particolare di Briozi e alghe Calcaree.
Ingrandimento 5x*

5.2.2 Campione SL

Il campione SL presenta una struttura eterogenea con tessitura granosostenuta. Gli allochimici presenti sono bioclasti di alghe calcaree, briozi e foraminiferi. Si riscontrano inoltre altri clasti quali quarzo e

peloidi. Sono presenti sia matrice micritica che cemento, la prima è a distribuzione eterogenea ed è in quantità maggiore, mentre il cemento è di tipo sia spiritico che microspartico. Dalle caratteristiche determinate possiamo classificare il campione come una Biomicrite (Folk 1959).

5.2.3 Campione M

Il campione M presenta una struttura eterogenea. Gli allochimici presenti sono bioclasti di foraminiferi (Fig. 51), alghe calcaree e briozoi. Sono presenti peloidi e cristalli di quarzo. La matrice è sia di natura micritica che cemento; la prima è a distribuzione eterogenea ed è in quantità maggiore, mentre il cemento è di tipo microspartico. La porosità è abbastanza alta. Dalle caratteristiche determinate possiamo classificare il campione come una Biomicrite (Folk 1959).

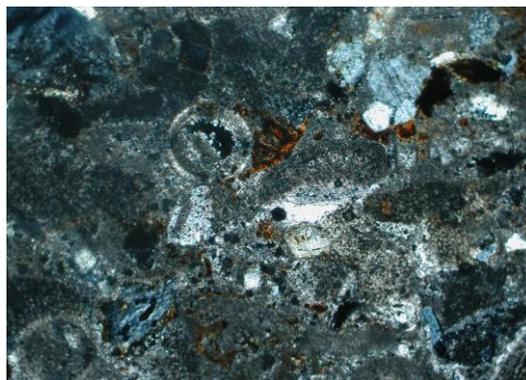


Fig. 51 - Particolare di foraminiferi - Ingrandimento 5x

5.2.4 Campione C

Il campione C è un marmo con struttura eteroblastica poligonale. I limiti granulari sono in alcuni casi dritti ed in altri curvi, e terminano in punti tripli a 120°. E' costituito nella quasi totalità da cristalli di calcite. Si riconoscono solo pochissimi cristalli di quarzo.



Fig. 52 - Cristalli di calcite a struttura saccaroide.

5.2.5 Campione L

Il campione L presenta un impasto grossolano con pasta di fondo eterogenea, di colore variabile da rossiccio a grigiastro (osservazioni a Nicols \\\) mediamente micacea e ad attività ottica da molto bassa ad assente. La distribuzione granulometrica degli inclusi è polimodale, il rapporto g:f (frazione grossolana:fine) è di circa 40:60, la classazione è scarsa. I vuoti, non molto frequenti, appartengono

soprattutto alla categoria buchi (forme irregolari). Gli inclusi aplastici presenti sono costituiti da abbondante quarzo (sia fine che grossolano), sia mono che policristallino, da K-feldspato, tra cui microclino, plagioclasio, frammenti di rocce di natura granitica-gneissica, miche, biotite e muscovite, rari pirosseni. Rare impronte di microfossili.

5.2.6 Campione SG

Il campione SG è costituito principalmente da cristalli di calcite di dimensioni medio grandi, con una distribuzione molto omogenea. Non si evidenziano delle isoorientazioni particolari dei vari cristalli.

5.2.7 Campione GF

Il campione GF presenta una struttura olocristallina eterogranulare. Sono presenti sia minerali sialici che femici. Tra i sialici abbiamo quarzo, che è tra i minerali più abbondanti. Si presenta con cristalli di dimensioni medio/grandi e, in alcuni casi, ha una struttura pecilitica. Poi abbiamo plagioclasio, che hanno una geminazione tipo albite e, in alcuni casi sono zonati.

Anch'essi sono molto abbondanti. Infine sono presenti sia microclino che ortoclasio, in quantità inferiore

rispetto ai precedenti. Il minerale femico presente è la biotite, che si presenta con cristalli (molto pleocroici) di diverse dimensioni. Vanno dal giallo-verde al bruno. Hanno alti colori d'interferenza. Sono molto abbondanti i cristalli in sezione prismatica, interessati da numerose sfaldature.

Il campione GF è simile al campione GG, dal quale se ne differenzia per le minori dimensioni dei cristalli.

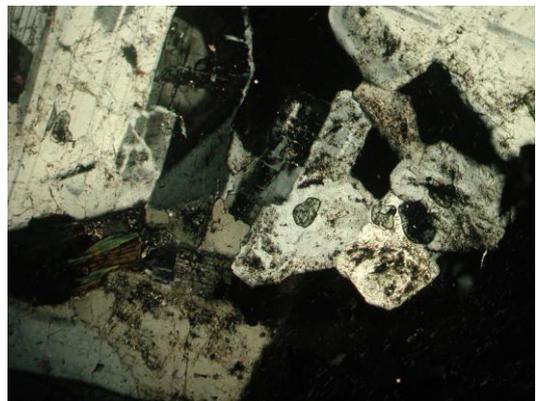


Fig. 53 - Particolare di minerali sialici e femici

5.3 Osservazioni macroscopiche e analisi biologiche a fresco su provini immersi per 3 mesi

Dopo tre mesi di immersione, corrispondente al periodo invernale, si è proceduto al recupero di alcune serie di provini, precisamente la serie 2 e la serie 5. Si è effettuata una prima osservazione visiva allo scopo di prelevare porzioni di patine biologiche.

Per ogni provino di ogni singola serie si è compilata una scheda SAMAS Bio I livello e, per alcuni provini, anche la scheda SAMAS Bio II livello.

5.3.1 Provini della Serie 2

Dall'osservazione macroscopica è risultato evidente che, i provini costituenti la serie numero 2, non si presentavano tutti colonizzati.

Analizzando più in dettaglio i provini della serie 2, si è notato che:

- i provini SL2, KF2, C2, GF2, LC2 presentavano una colonizzazione con una biofilm esteso su tutta o parte della superficie; sono stati osservati talli di color rosso ruggine, da associare a crescite algali.
- i provini L2, KG2, GG2, M2, LG2 e LL2 non sono risultati colonizzati.

La tabella sottostante riporta in sintesi i risultati dell'osservazione macroscopica sulla componente biologica eseguita sui provini dopo il recupero in mare.



Fig. 54 - Confronto della serie 2 di provini. Prima (a destra) e dopo l'immersione in mare per 3 mesi (a sinistra)

TIPOLOGIA DI MATERIALE	SIGLA	NUMERO DI SERIE	DIMENSIONI PROVINI	TEMPO DI IMMERSIONE	ANALISI MACROSCOPICHE
Laterizio	L2	N°2	5x5x2	3 mesi	Colonizzazione assente
Pietra di Mendicino	M2	N°2	5x5x2	3 mesi	Colonizzazione assente
Pietra di Capo Colonna	KG2	N°2	5x5x2	3 mesi	Colonizzazione assente
Granito Silano	GF2	N°2	5x5x2	3 mesi	Presenza di Biofilm
Pietra di San Lucido	SL2	N°2	2x2x1	3 mesi	Presenza di Biofilm
Laterizio	LL2	N°2	2x2x1	3 mesi	Colonizzazione assente
Laterizio	LC2	N°2	2x2x1	3 mesi	Presenza di Biofilm
Granito Silano	GG2	N°2	5x5x2	3 mesi	Colonizzazione assente
Laterizio	LG2	N°2	2x2x1	3 mesi	Colonizzazione assente
Marmo di Carrara	C2	N°2	5x5x2	3 mesi	Presenza di Biofilm
Pietra di Capo Colonna	KF2	N°2	5x5x2	3 mesi	Presenza di Biofilm

Fig. 55 - Tabella riassuntiva dell'osservazione macroscopica sui provini della serie 2 dopo il recupero di 3 mesi

5.3.2 Provini della serie 5

L'osservazione della serie 5 ha mostrato come tutti i provini si presentavano colonizzati, con percentuali diverse e mostravano un evidente insabbiamento. E' stato osservato che:

- il provino L5 presentava una colonizzazione su circa la metà della superficie;
- il provino SG5 era colonizzato per intero;
- il provino GF5 presentava un'estesa colonizzazione, eccetto pochi punti della superficie;
- i provini C5, KF5, GG5 erano molto colonizzati, presentando una intensa copertura biologica;
- il provino SL5 era ampiamente colonizzato.



Fig. 56 - Confronto della serie 5 di provini prima (a destra) e dopo l'immersione in mare per 3 mesi (a sinistra)

La tabella seguente riporta in sintesi i risultati dell'osservazione biologica eseguita sui provini dopo il recupero in mare.

TIPOLOGIA DI MATERIALE	SIGLA	NUMERO DI SERIE	DIMENSIONI PROVINI	TEMPO DI IMMERSIONE	ANALISI MACROSCOPICHE
Laterizio	L5	N°5	5x5x2	3 mesi	Presenza di Biofilm
Pietra di Mendicino	M5	N°5	5x5x2	3 mesi	Presenza di Biofilm
Pietra di Capo Colonna	KG5	N°5	5x5x2	3 mesi	Presenza di Biofilm
Granito Silano	GF5	N°5	5x5x2	3 mesi	Presenza di Biofilm
Pietra di San Giorgio	SG5	N°5	5x5x2	3 mesi	Presenza di Biofilm
Granito Silano	GG5	N°5	5x5x2	3 mesi	Presenza di Biofilm
Marmo di Carrara	C5	N°5	5x5x2	3 mesi	Presenza di Biofilm
Pietra Capo Colonna	KF5	N°5	5x5x2	3 mesi	Presenza di Biofilm

Fig. 57 - Tabella riassuntiva dell'osservazione macroscopica sui provini della serie 5 dopo il recupero di 3 mesi

Dalle analisi delle serie di provini immersi per 3 mesi (serie 2 e serie 5) si può affermare che la colonizzazione biologica è presente soprattutto sotto forma di biofilm, mentre le colonizzazioni di forme vegetali macroscopiche sono alquanto ridotte e in alcuni casi completamente assenti.

Da una prima indagine si può notare come sia diversa per ogni litotipo la biorecettività (l'attitudine di un materiale ad essere colonizzato da uno o più gruppi di organismi senza andare incontro necessariamente al biodeterioramento) dimostrata dal diverso grado di colonizzazione sui provini in esame.

Le foto scattate al microscopio relative alle patine sono state documentate (allegato D)

5.4 Osservazioni allo stereomicroscopio dei provini immersi per un periodo di 3 mesi.

Ciascun provino è stato staccato dalla malta e dalla piastrella su cui poggiava ed è stato fotografato singolarmente e lasciato asciugare, prima di essere osservato allo stereomicroscopio.

Dall'osservazione allo stereomicroscopio della serie 2 si evince che:

- i provini L2, KG2 e LG2 non sono colonizzati;
- i provini LL2, LC2, SL2, GG2, C2, KF2,M2 e Gf2 presentano una colonizzazione ricca di patine verdi, talli incrostanti di alghe rosse.

Dall'osservazione allo stereomicroscopio della serie 5 si evince che:

- i provini L5, GF5, KG5, C5, GG5, KF5 e SL5 si presentano ricoperti di sabbia con talli algali incrostanti e residui organici,
- il provino SG5 presenta sotto la sabbia un fitto intreccio verde;
- il provino M5 non presenta particolari vegetali vista l'alta copertura di sabbia.



Fig. 58 - Foto scattata allo stereomicroscopio

Le osservazioni allo stereomicroscopio sono state documentate (allegato E).

5.5 Analisi del degrado

Al fine di valutare lo stato di degrado dei provini immersi per tre mesi, sono state eseguite ulteriori indagini petrografiche in sezione stratigrafica per determinare l'eventuale presenza di patine superficiali.

5.5.1 Campione L2

Sul campione è evidente lo sviluppo della patina superficiale, discontinua, omogenea, con spessore compreso tra 40 e 200 μ m (Fig. 59a).

La morfologia segue quella del substrato e in alcune parti sono evidenti delle sacche di compenetrazione (Fig. 59b) indicanti l'inizio della disgregazione del substrato.

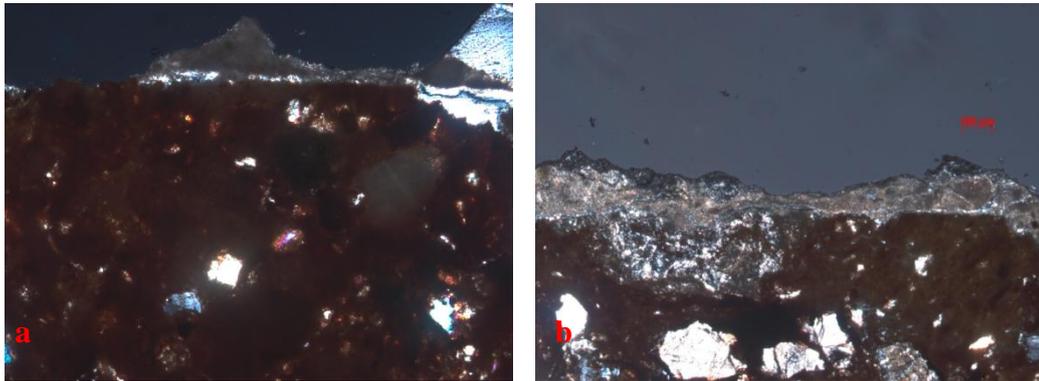


Fig. 59 – (a) Patina su corpo ceramico; (b) interfaccia substrato-patina con compenetrazioni

5.5.2 Campione GG2

Su tale substrato è evidente la formazione di una patina superficiale (Fig. 60a), discontinua, omogenea e con uno spessore variabile compreso tra 20 e 130 μm (Fig. 60b).

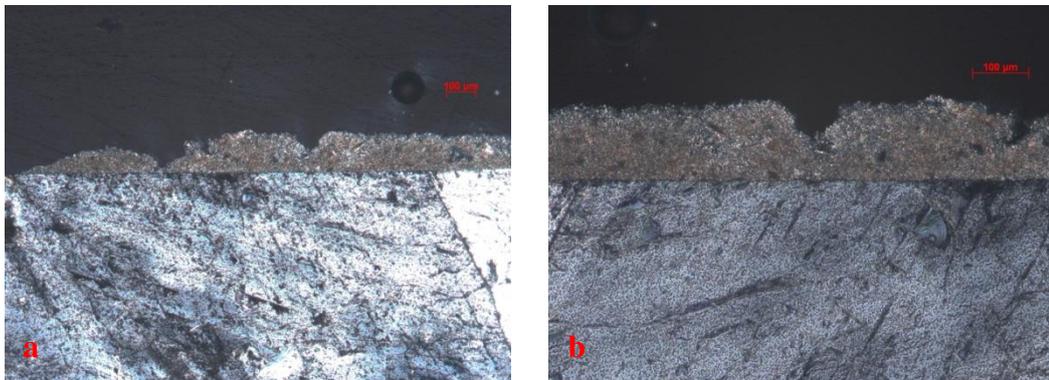


Fig. 60 - (a) interfaccia substrato-patina; (b) particolare patina

5.5.3 Campione KF2

Il campione comincia ad essere interessato da una patina superficiale molto sottile. La patina si presenta discontinua, omogenea e con uno spessore compreso tra 10 e 50 μm (Fig. 61a). La morfologia segue quella del substrato e in alcune parti sono evidenti delle sacche di compenetrazione (Fig. 61b).

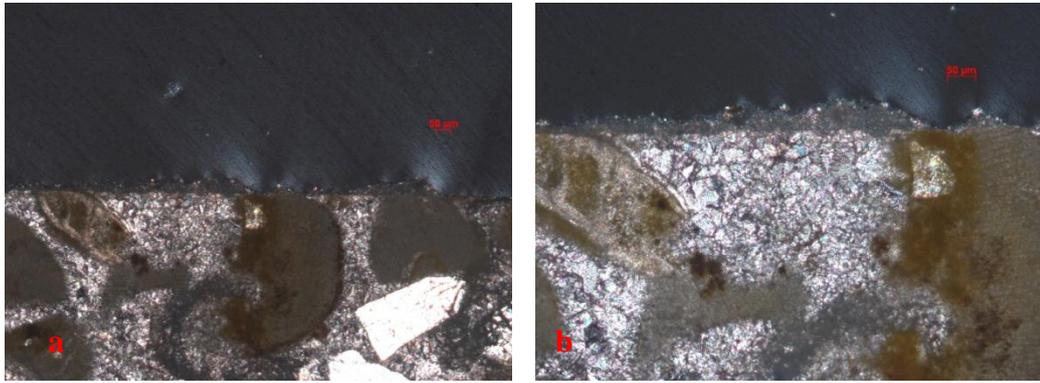


Fig. 61 - (a) interfaccia substrato-patina; (b) particolare patina con sacche di penetrazione

5.5.4 Campione SG5

Su tale campione è evidente la formazione delle prime porzioni di patine. Questa si presenta discontinua, omogenea e con lo spessore minimo compreso tra 20 e 40 µm (Fig. 62a, 62b). Non si osservano compenetrazioni all'interno del materiale, ma solo accrescimenti superficiali.

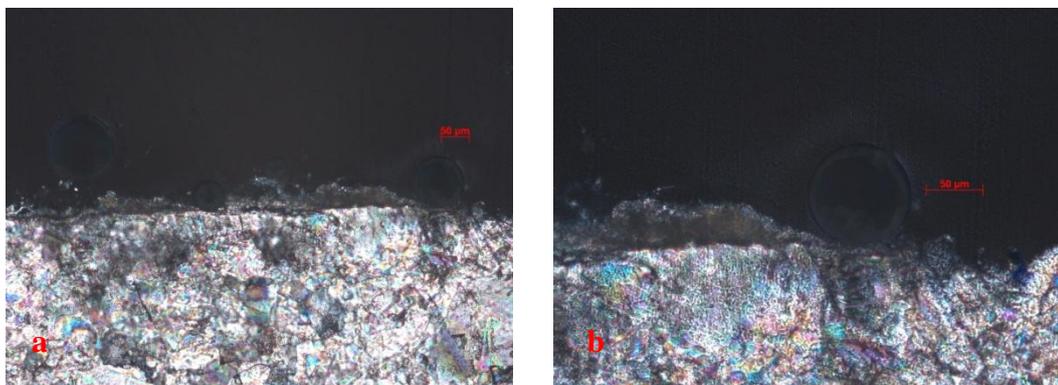


Fig. 62 - (a) interfaccia substrato-patina; (b) particolare patina

5.5.5 Campione SL5

Su tale campione è evidente la formazione delle prime porzioni di patina. Questa si presenta superficiale, discontinua, omogenea e con minimo spessore compreso tra 10 e 50 µm (Fig. 63a). La morfologia segue quella del substrato e in alcune parti sono evidenti delle sacche di penetrazione (Fig. 63b).

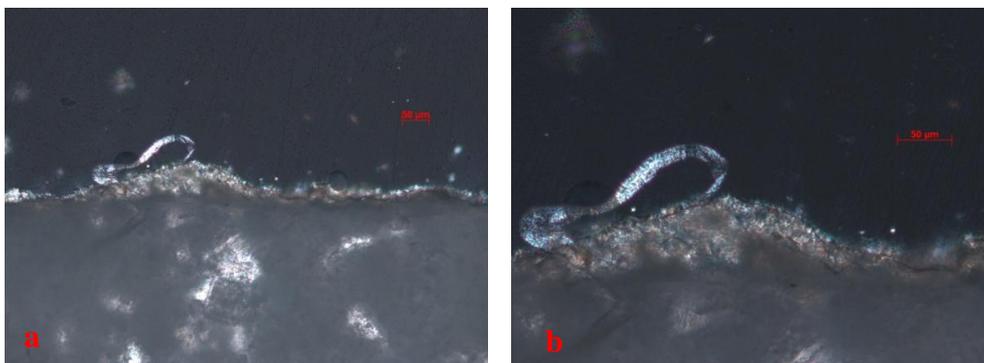


Fig. 63 - (a) interfaccia substrato-patina; (b) particolare patina e penetrazioni

5.6 Rielaborazione dati

I dati ottenuti dalle osservazioni al microscopio ottico dei campioni immersi per tre mesi sono stati rielaborati mediante un istogramma in cui si è riportato lo spessore minimo e quello massimo riscontrato per ogni campione. Si noti come il campione L2, ovvero il laterizio, presenti uno spessore della patina elevato rispetto agli altri campioni che, ad eccezione del campione GG2 (granito, il cui spessore massimo supera i 100 μm), presentano uno spessore massimo che non supera i 50 μm .

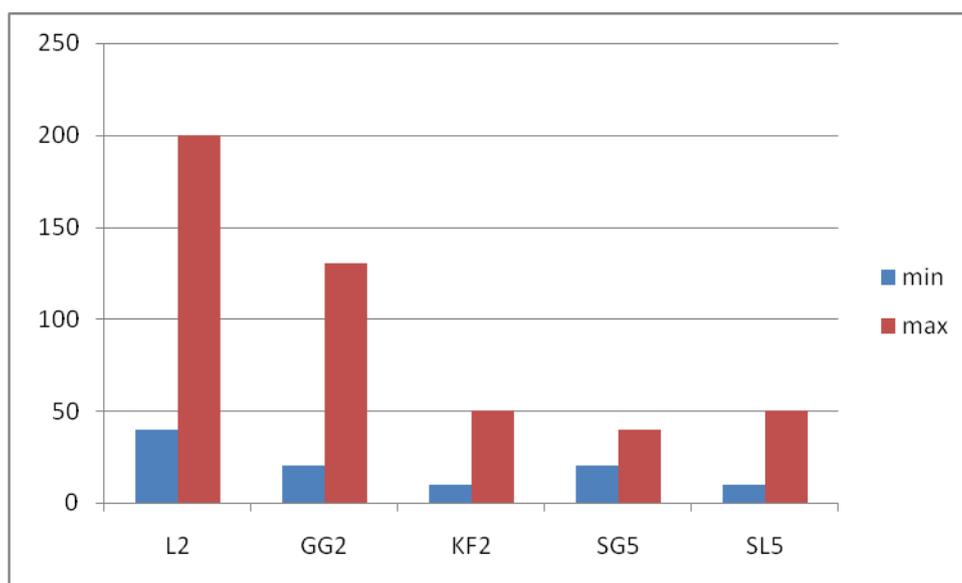


Fig. 64 - (a) Istogramma in cui si riportano i valori relativi agli spessori della patina

5.7 Osservazioni al microscopio elettronico a scansione (S.E.M.) dei provini immersi per un periodo di 3 mesi

L'osservazione al SEM ha permesso di studiare in dettaglio le caratteristiche morfologiche della porzione degradata dei vari campioni con particolare riferimento alla colonizzazione superficiale.

5.7.1 Provini della serie 2

In particolare, tale indagine ha permesso di mettere in evidenza le diverse quantità di sali in tutti i campioni. Infatti:

- il provino LL2 presenta in abbondanza molti sali (in prevalenza cloruro di sodio);
- il provino LC2 presenta molti cloruri di sodio ma la superficie non appare degradata. Si notano inoltre briozoi e diatomee su tutta la superficie del provino;

- il provino SL2 presenta diverse diatomee e poca precipitazione di sali;
- sul provino GG2 vi sono numerose diatomee e briozoi, ed alcuni cuscinetti di alghe scure;
- il provino C2 si presenta ricco di colonie di diatomee di forma allungata. Sono evidenti fenomeni di decoesione. Infatti, si presenta molto sgretolato con una numerosa presenza di precipitazione di sali;
- il provino KF2 presenta sulla superficie diverse diatomee;
- il provino GF2 si presenta molto alterato.

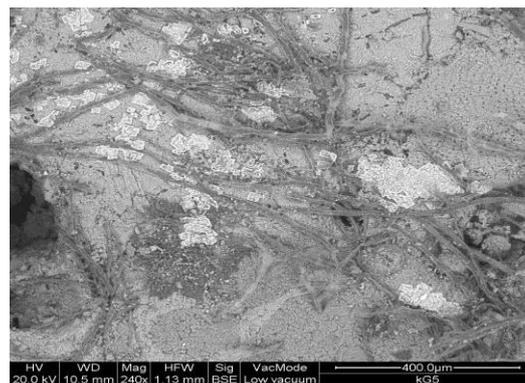


Fig. 65 - Foto del provino KG5 scattata al S.E.M.

5.7.2 Provini della serie 5

Il provino SG5 presenta diverse diatomee, briozoi e scarsa precipitazione di sali ed il provino si presenta alterato.

Il provino GF5 presenta alcuni briozoi sulla superficie. Si nota una degradazione della biotite dovuta alla presenza di talli algali.

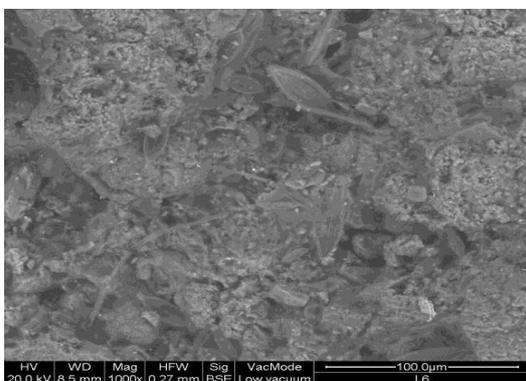


Fig. 66 - Foto del provino L6 scattata al S.E.M.

Il provino KG5 presenta una colonizzazione animale, rappresentata da briozoi ed una colonizzazione vegetale, rappresentata da talli algali. Il provino appare molto sgretolato e ricco di precipitazione di sali.

Il provino C5 presenta sia filamenti algali che talli algali incrostanti. Vi si notano pochi sali.

Il provino SL5 presenta diverse diatomee, filamenti algali e briozoi. Il provino si presenta degradato.

Le osservazioni al S.E.M. dei provini delle serie 2 e 5 sono documentate da fotografie (allegato F).

5.8 Osservazioni macroscopiche e analisi biologiche su campioni freschi dei provini dopo 12 mesi di immersione

Per questa serie si è utilizzata la stessa metodica effettuata sui provini di 3 mesi. Le due serie immerse nei contenitori di acqua di mare sono state osservate macroscopicamente.

Da questa osservazione è risultato che:

- la serie 1, costituita dai provini L1, KG1, LL1, LC1, SL1, LG1, LM1, SG1, GG1, C1, KF1, M1, GF1, contenente al momento dell'immersione in acqua 9 provini di dimensione 5x5x2 cm (L1, KG1, SL1, SG1, GG1, C1, KF1, M1 GF1) e 4 provini di dimensioni 2x2x1 cm (LL1, LC1, LG1, LM1), nel momento del suo recupero, si presentava priva di tutti i provini di dimensione 2x2x1. Inoltre, risultava essere priva anche di quasi tutti i provini di dimensioni 5x5x2 cm eccetto il provino KG1 e il provino GG1. A causa delle correnti marine, ed alle cattive condizioni climatiche che si sono verificate nei mesi precedenti al recupero, la piastrina su cui erano stati fissati i provini non si presentava più intera (come al momento dell'immersione) ma spezzata a metà e con tutti i provini persi in mare eccetto due soltanto KG1, GG1;
- la serie 6 costituita dai provini L6, SG6, GF6, M6 KG6, C6, SL6, GG6, KF6, SF6, contenente al momento dell'immersione in acqua 9 provini, ciascuno di dimensioni 5x5x2, al momento del suo recupero, dopo dodici mesi, si presentava completa di tutti i suoi provini. Le piastrine su cui erano stati fissati i provini al momento del recupero si presentavano intere e ben posizionate sul fondale marino.

Le due serie presentavano una colonizzazione vegetale ben sviluppata, dove si individuavano forme vegetali macroscopiche ben definibili.

5.8.1 Provini della serie 1

L'osservazione macroscopica è stata condotta solo sui provini KG1 e GG1.

Il provino KG1 presenta una colonizzazione di patine algali e di numerosi filamenti algali ricoprenti la superficie dal 61-100%.

Il provino GG1 presenta una colonizzazione da biofilm per tutta l'area. Si possono notare organismi vegetali a forma di cuscinetti di color rosso da associare a talli algali.



Fig. 67 - Confronto della serie 1 di provini prima (a destra) e dopo l'immersione in mare per 12 mesi (a sinistra)

5.8.2 Provini della serie 6

I 9 provini si presentano colonizzati in percentuali diverse:

- i provini L6 e KG6, GG6, SL6 risultano avere una copertura biologica intensa, accompagnata da biofilm;

- il provino SG6 è colonizzato per intero da numerose patine con numerosi filamenti algali, tali da formare un intreccio per tutta la superficie;
- il provino GF6 presenta numerosi filamenti algali;
- quello M6 è ricco di patine algali;
- il provino C6 è fortemente colonizzato da alghe ed il provino KF6 si presenta poco colonizzato;
- una copertura biologica intensa accompagnata da biofilm contraddistingue il provino GG6.



Fig. 68 - Confronto della serie 6 di provini prima (a destra) e dopo l'immersione in mare per 12 mesi (a sinistra)

Da questa prima osservazione si evince che la serie si presenta ben colonizzata. Sono infatti presenti forme vegetali macroscopiche e soprattutto uno sviluppo di biofilm più accentuato rispetto ai tre mesi.

TIPOLOGIA DI MATERIALE	SIGLA	NUMERO DI SERIE	NUMERO DI SERIE	TEMPO DI IMMERSIONE	ANALISI MACROSCOPICHE
Laterizio	L6	N°6	5x5x2	12 mesi	Presenza di colonizzazione
Pietra di Mendicino	M6	N°6	5x5x2	12 mesi	Presenza di colonizzazione
Pietra di Capo Colonna	KG1	N°1	5x5x2	12 mesi	Presenza di colonizzazione
Granito Silano	GF6	N°6	5x5x2	12 mesi	Presenza di colonizzazione
Pietra di San Lucido	SL6	N°6	2x2x1	12 mesi	Presenza di colonizzazione
Granito Silano	GG1	N°1	5x5x2	12 mesi	Presenza di colonizzazione
Marmo di Carrara	C6	N°6	5x5x2	12 mesi	Presenza di colonizzazione
Pietra di Capo Colonna	KF6	N°6	5x5x2	12 mesi	Presenza di colonizzazione
Pietra di Capo Colonna	KG6	N°6	5x5x2	12 mesi	Presenza di colonizzazione
Granito Silano	GG6	N°6	5x5x2	12 mesi	Presenza di colonizzazione
Pietra di San Giorgio	SG6	N°6	5x5x2	12 mesi	Presenza di colonizzazione

Fig. 69 - Tabella riassuntiva dell'osservazione macroscopica dei provini della serie 1 e della serie 6 dopo il recupero di 12 mesi

5.9 Osservazioni allo stereomicroscopio dei provini recuperati dopo 1 anno

Per tutte e due le serie si è osservato solo il lato superiore di ciascun provino poiché gli altri lati erano ricoperti di malta; solo in pochi provini si è proceduto alla suddivisione in livelli poiché la

colonizzazione era del tutto omogenea. I provini sono stati documentati fotograficamente (allegato I). Dalle osservazioni eseguite allo stereomicroscopio sui singoli provini si è notata l'intensa colonizzazione ed in alcuni casi si è arrivati ad identificare alcune specie algali (allegato H).

Il provino KG1 si presentava molto colonizzato da patine e da numerosi filamenti algali, accompagnati da una presenza di biofilm, di alghe verdi (come *Caulerpa racemosa*) ed alghe rosse (come *Corallina elongata*).

Il provino GG1 presentava una colonizzazione da biofilm per tutta l'area. Erano evidenti organismi vegetali a forma di cuscinetto color rosso, da associare a talli algali e alghe verdi. Il provino L6 era colonizzato al 100% da una massa mucillaginosa attribuibile a biofilm. Si notava, inoltre, la presenza di alghe brune come *Padina pavonia*. Il provino SG6 presentava numerose patine, filamenti algali e la specie *Caulerpa racemosa*.

I provini GF6 e C6 presentavano qualche tallo di alghe brune, filamenti di alghe incrostanti con una colonizzazione altissima sulla superficie.

I provini M6 e KG6 presentavano una colonizzazione animale molto bassa a fronte di un'altissima colonizzazione vegetale (solo di alghe verdi). Si notava inoltre la presenza di alghe brune (come la specie *Dictyota dichotoma* su tutta la superficie).

I provini SL6 e GG6 presentavano una colonizzazione vegetale al 100%. Si notavano vari talli algali ramificati tali da formare un intreccio per tutta la superficie, inoltre presentavano qualche sporadico tallo algale incrostante. Infine, il provino KF6 presentava una colonizzazione vegetale pari al 50% con una presenza di alghe incrostanti e alghe brune come di *Dictyota dichotoma* e di qualche filamento di alghe brune.

5.10 Analisi del degrado

Al fine di valutare lo stato di degrado dei provini immersi per 12 mesi, sono state eseguite ulteriori indagini petrografiche in sezione stratigrafica, per determinare le variazioni rispetto ai campioni immersi per tre mesi.

5.10.1 Campione L6

Dal punto di vista del degrado, il campione è interessato dalla presenza di una patina superficiale. Quest'ultima si presenta abbastanza omogenea ma discontinua, con uno spessore variabile compreso

tra circa 10-200 μm . La morfologia segue quella del substrato e, in diverse parti, sono evidenti delle sacche di compenetrazione (Fig. 70b).

La patina evidenzia inoltre la presenza di inclusi di quarzo policristallino, cosa che indica come si sia sviluppata a discapito dei componenti del corpo ceramico (Fig.70a).

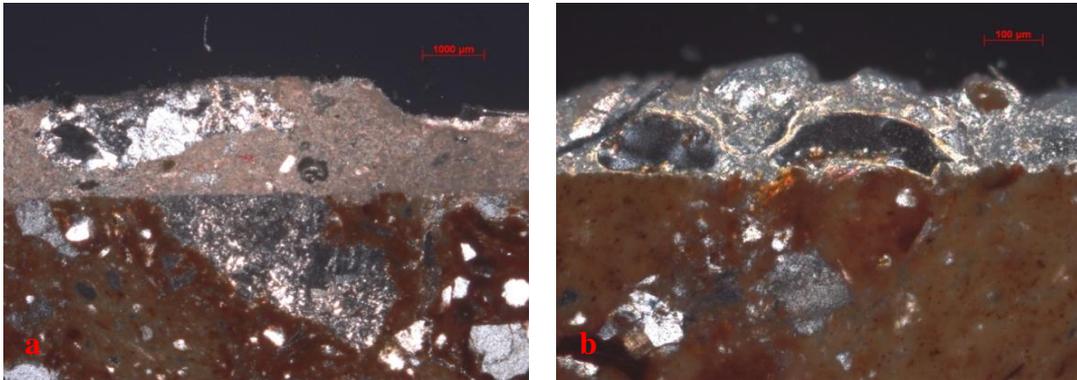


Fig. 70 - (a) interfaccia substrato-patina con inclusi di quarzo; (b) particolare patina e compenetrazioni

5.10.2 Campione SG6

Il campione presenta una patina discontinua, omogenea e con uno spessore variabile compreso tra circa 20-200 μm (Fig. 71a). La patina è superficiale e si osservano solo piccole compenetrazioni all'interno del materiale (Fig. 71b).

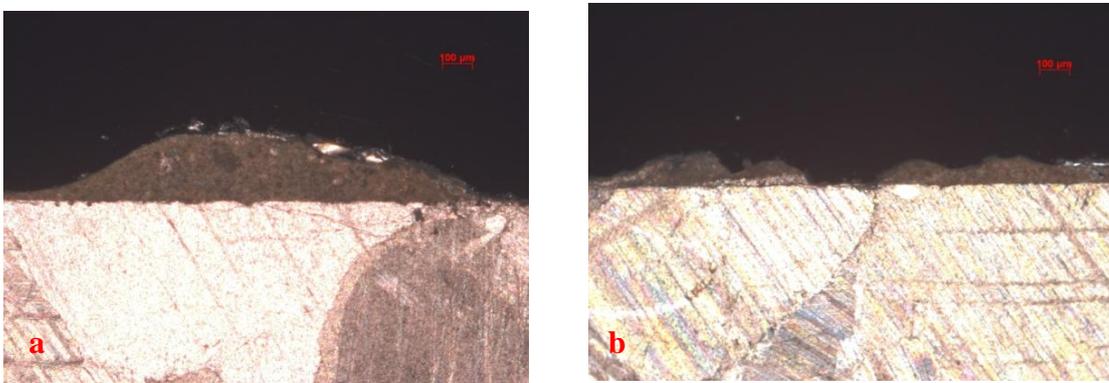


Fig. 71 - (a) interfaccia substrato-patina con inclusi di quarzo; (b) particolare patina e compenetrazioni

5.10.3 Campione SL6

Dal punto di vista del degrado, il campione presenta solo piccole porzioni di patina, probabilmente dovute alla natura del substrato che, essendo carbonatico, si disgrega senza dare la possibilità alla patina di formarsi. Questa si

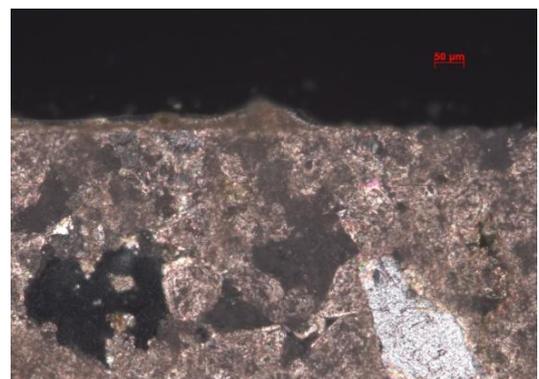


Fig. 72 - Interfaccia substrato-patina

presenta superficiale, discontinua, omogenea e con spessore compreso tra 10 e 50 μm (Fig. 72).

5.10.4 Campione GG1

Il campione presenta una patina, discontinua, omogenea, con uno spessore variabile compreso tra 20 e 200 μm (Fig. 73a). La patina determina, in alcune zone, disgregazioni superficiali del materiale (Fig. 73b).

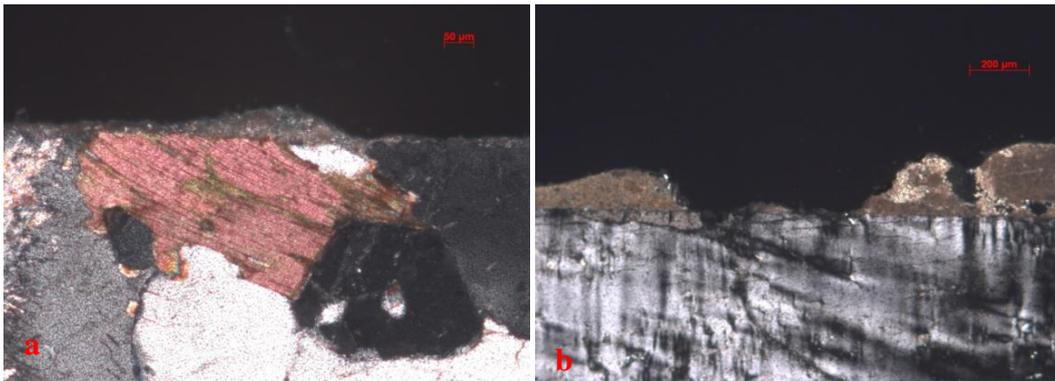


Fig. 73 – (a) interfaccia substrato-patina; (b) particolare patina e disgregazioni del substrato

5.10.5 Campione M6

Dal punto di vista del degrado, il campione presenta solo piccole porzioni di patina, probabilmente dovuto alla natura del substrato che, essendo carbonatico, si disgrega senza dare la possibilità alla patina di formarsi. Questa si presenta superficiale, discontinua e sottile con spessore compreso tra 10 e 50 μm . In alcune zone, la patina determina piccole sacche di compenetrazione (Fig. 74).

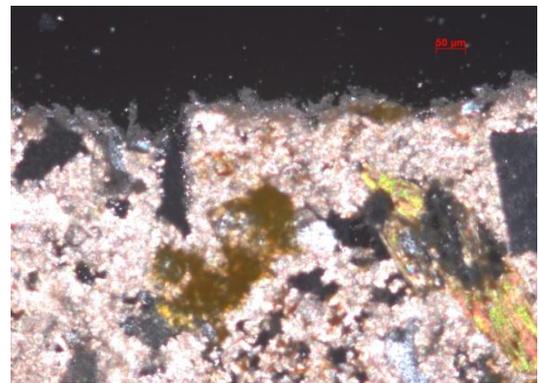


Fig. 74 - Interfaccia substrato-patina

5.10.6 Campione GF6

Il campione presenta una patina, discontinua, omogenea e con uno spessore compreso tra 20 e 40 μm (Fig. 75a). La patina presenta zone di compenetrazione che disgregano superficialmente il substrato (Fig. 75b).

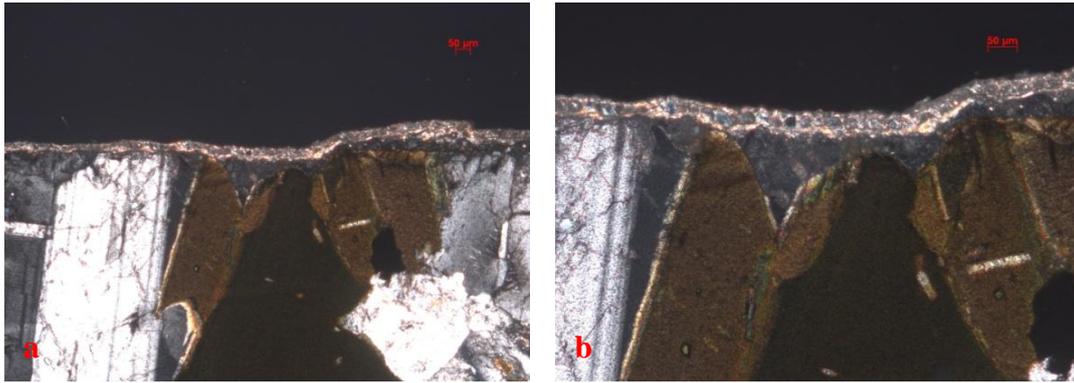


Fig. 75 – (a) interfaccia substrato-patina; (b) particolare patina e disgregazioni del substrato

5.10.7 Campione GG6

Dal punto di vista del degrado il campione presenta una patina abbastanza continua, omogenea e con uno spessore compreso tra 10 e 60 μm (Fig. 76a). La patina presenta zone di compenetrazione che disgregano superficialmente il substrato (Fig. 76b).

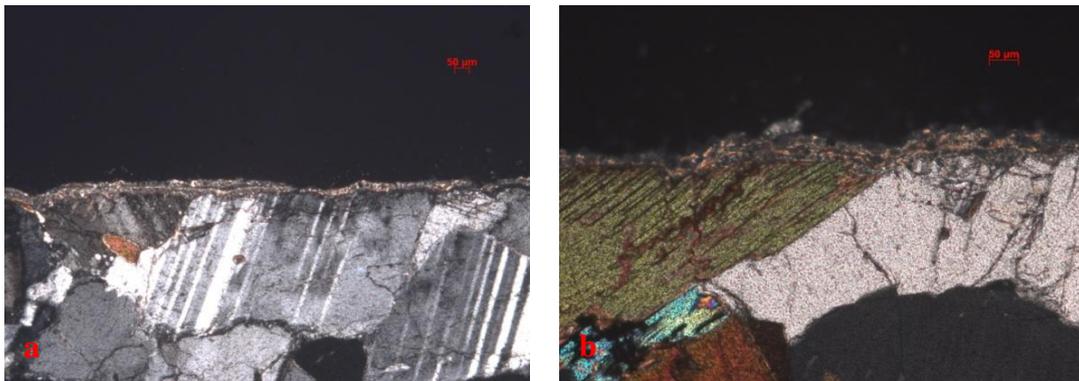


Fig. 76 - (a) interfaccia substrato-patina; (b) particolare patina con sacche di compenetrazione

5.10.8 Campione C6

Il campione presenta una patina discontinua, omogenea e con uno spessore compreso tra 20 e 150 μm (Fig. 77a). In alcune porzioni è possibile apprezzare delle sacche di compenetrazione nel substrato (Fig. 77b).

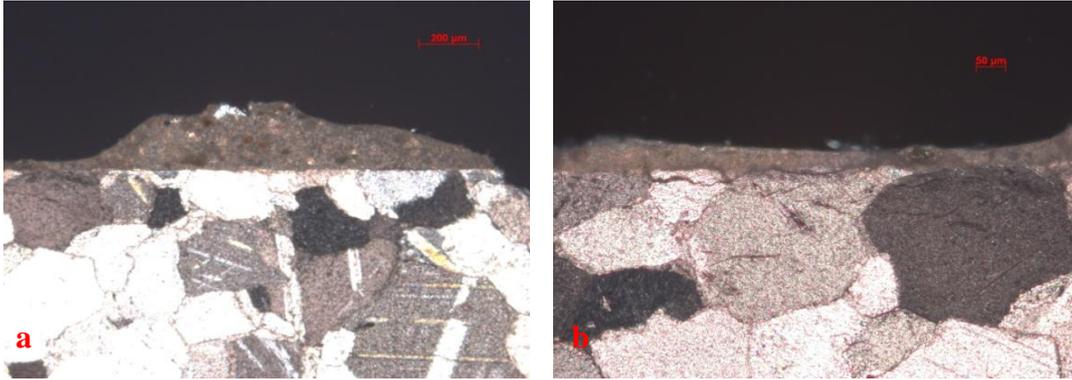


Fig. 77 - (a) interfaccia substrato-patina; (b) particolare patina con sacche di penetrazione

5.10.9 Campione KF6

Il campione presenta solo in alcune zone una patina poco compatta che si presenta superficiale, discontinua e con uno spessore compreso tra 20 e 100 µm (Fig. 78a, 78b).

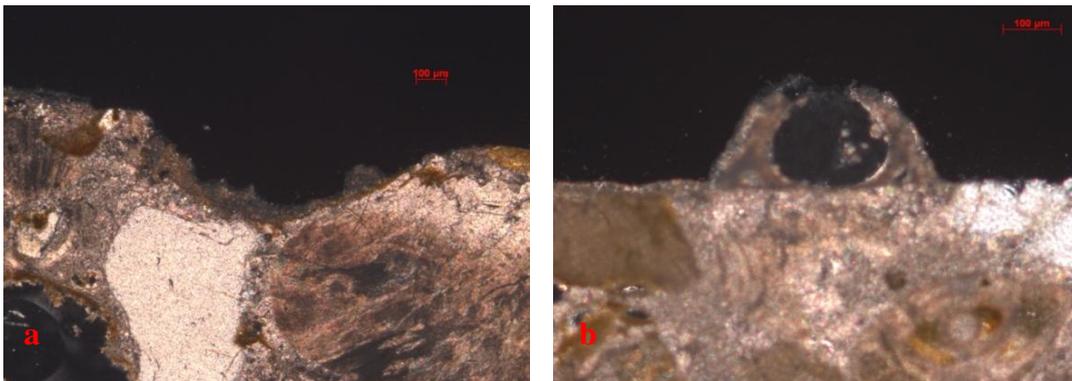


Fig. 78 - (a) interfaccia substrato-patina; (b) particolare concrescimento patina

5.10.10 Campione KG1

Sul campione è presente, solo in alcune zone, una patina che si presenta superficiale, discontinua, omogenea e con uno spessore compreso tra 20 e 150 µm (Fig. 79).

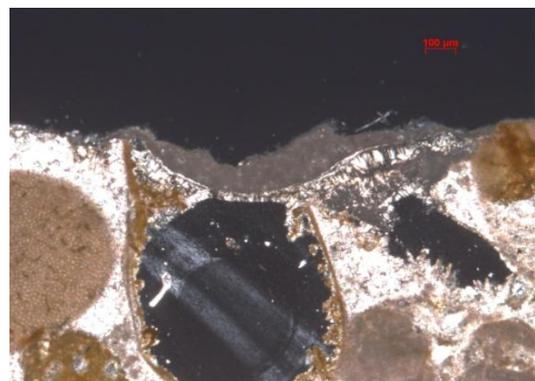


Fig. 79 - interfaccia substrato-patina

5.10.11 Campione KG6

Su tale campione la patina è presente solo in alcune porzioni e si presenta discontinua, omogenea, con uno spessore compreso tra 10 e 60 μm .

In alcune porzioni presenta sacche di compenetrazione (Fig. 80).

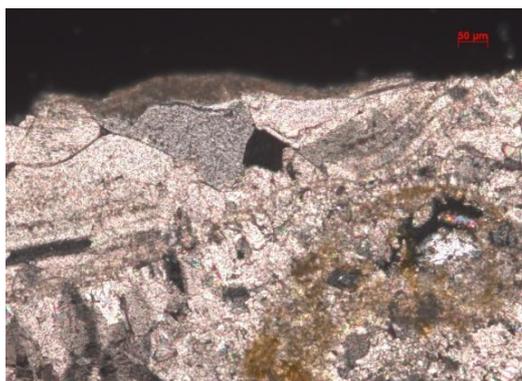


Fig. 80 - Interfaccia substrato-patina con sacche di compenetrazione

5.11 Osservazioni al S.E.M. dei provini immersi per un periodo di 1 anno

L'osservazione al S.E.M. ha permesso di studiare in dettaglio le caratteristiche morfologiche della porzione degradata dei vari campioni, con particolare riferimento alla colonizzazione superficiale.

In alcuni casi, è stato possibile osservare alcuni fenomeni di microerosione ed alterazione dei provini. Nel dettaglio, si è visto che il provino GG1 presentava numerosi filamenti algali che attaccavano



Fig. 81 - Attacco biologico alla biotite nel provino GG1

maggiormente la biotite; inoltre, si è osservata la presenza sporadica di alcuni briozoi.

Il provino KG1 presentava cloruri di sodio e numerosi cristalli, ma la superficie non è apparsa degradata, notandosi, inoltre, numerosi filamenti algali per tutta la superficie del provino.

Il provino SG6 presentava numerosi talli algali e fenomeni di microerosione, presenza di briozoi e substrato alterato. Il provino GF6 si presentava completamente ricoperto di briozoi, mentre i provini KG6, C6, SL6, M6, KF6, L6, GG6, presentavano una colonizzazione di diversi talli algali ed alcuni briozoi, accompagnati da processi di microerosione.

Le fotografie delle serie 1 e 6, scattate al S.E.M., sono riportate nell' allegato L.

5.12 Elaborazione dei dati

I dati ottenuti dalle osservazioni dei campioni, immersi per 12 mesi, al microscopio ottico sono stati rielaborati tramite istogramma avente sull'asse delle ascisse i vari campioni e sulle ordinate lo spessore della patina.

E' evidente come i campioni SG6, GG1 e L6 (pietra di San Giorgio, granito e laterizio) presentino una patina con uno spessore più elevato rispetto agli altri campioni.

I provini C6 e KG1, marmo e pietra di Capo Colonna a grana grossa, evidenziano patine con spessore massimo di 150 μm , mentre il provino KF6, cioè la pietra di Capo Colonna a grana fine, presenta uno spessore massimo di 100 μm .

Il resto dei provini mostra patine con valori massimi di spessore intorno a 50 μm .

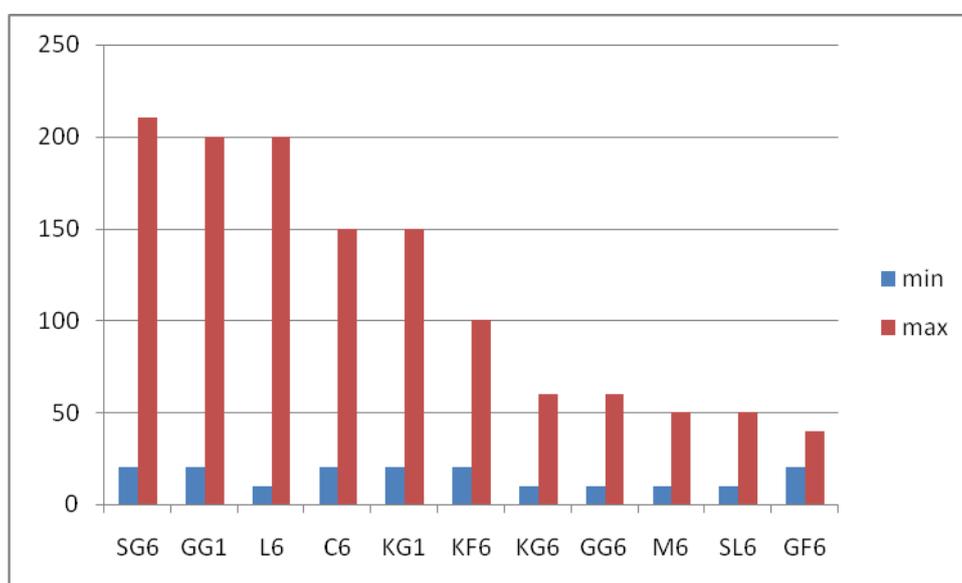


Fig. 82- Istogramma in cui si riportano i valori relativi agli spessori della patina

E' evidente, dunque, come la permanenza all'interno dell'ambiente marino delle diverse tipologie di materiali, naturali ed artificiali, determini la formazione di patine che si sviluppano nel tempo.

Infatti, eseguendo un confronto tra i provini immersi per tre e quelli per dodici mesi, risulta che:

- i provini della pietra di Capo Colonna a grana fine, da 3 a 12 mesi, subiscono un aumento del 50% dello spessore della patina;

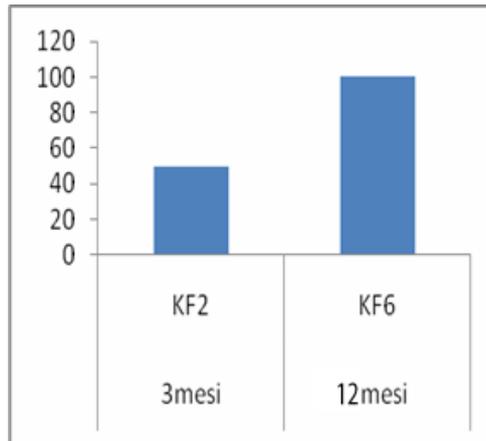


Fig. 83 – Istogramma del confronto dello spessore della patina tra KF2 (3mesi) e KF6 (12 mesi)

- i provini di marmo subiscono un aumento dello spessore della patina (infatti, fino a 3 mesi, non presentano alcuna patina);

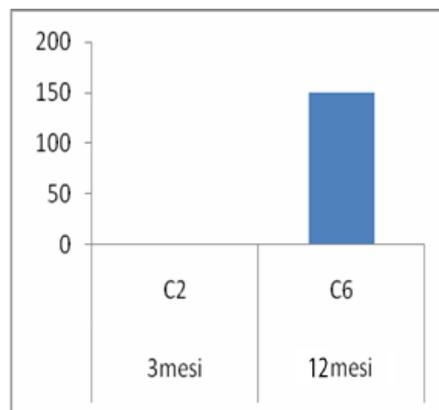


Fig. 84 - Istogramma in cui si mostra il confronto dello spessore della patina tra C2 (3mesi) e C6 (12mesi)

- i provini della pietra di San Giorgio subiscono un aumento notevole dello spessore della patina;

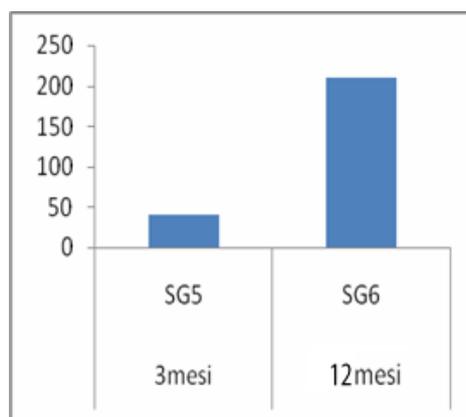


Fig. 85 - Istogramma mostrante il confronto dello spessore della patina tra SG5 (3mesi) e SG6 (12mesi)

- i provini dei granoidi della Sila a grana grossa subiscono un aumento di circa l'80% dello spessore della patina;

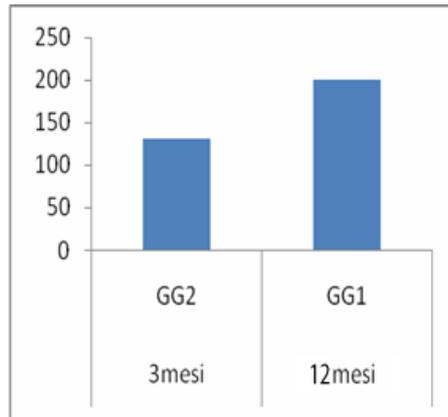


Fig. 86 – Istogramma con il confronto dello spessore della patina tra GG2(3mesi) e GG1 (12mesi)

- per quanto riguarda i provini di laterizio e quelli del calcare di San Lucido, non si apprezzano variazioni dello spessore (che si mantiene costante dai 3 ai 12 mesi).

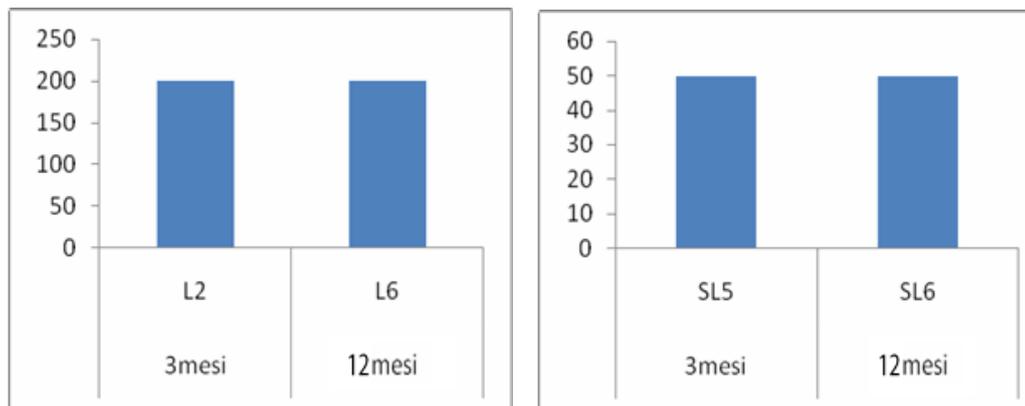


Fig. 87 - Istogrammi con il confronto dello spessore della patina tra L2 (3mesi) e L6 (12mesi) e tra SL5 (3mesi) e SL6 (12mesi)

5.13 Considerazioni conclusive

Dalle osservazioni eseguite mediante le diverse metodologie analitiche, è risultato evidente che su alcuni litotipi si comincia a apprezzare una colonizzazione biologica già dopo tre mesi di immersione. Nei campioni osservati al microscopio ottico si nota la presenza di Cloroficce filamentose, di molte diatomee e di biofilm. Dal punto di vista abiotico la formazione di un biofilm è necessario per l'attivazione e lo sviluppo dei processi di alterazione. Questo processo abiotico porta alla generazione di un film di spessore molto sottile che determina una modificazione delle caratteristiche chimico-fisiche della superficie dei materiali lapidei.

Dall'osservazione dei provini si è potuto stimare in modo approssimato la percentuale di colonizzazione sui diversi litotipi sia per i 3 mesi che per i 12 mesi di immersione (v. istogramma sottostante).

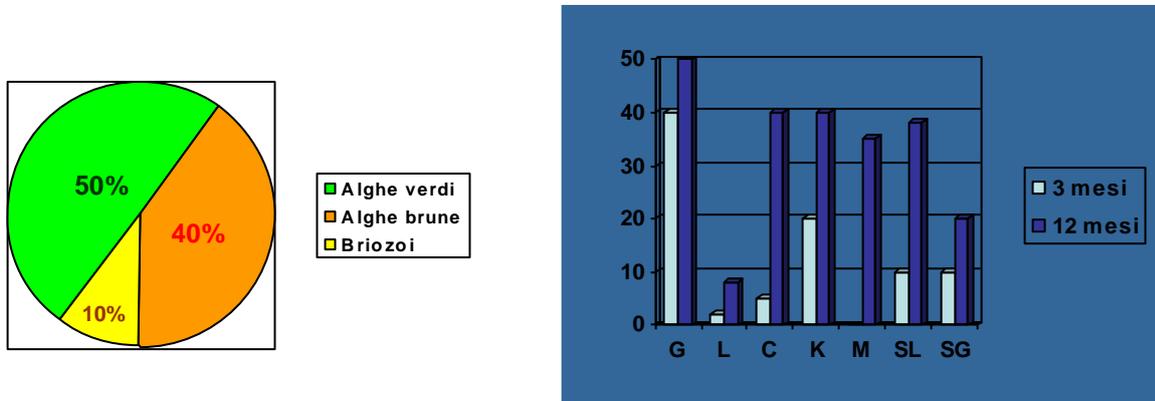


Fig. 88 - Istogramma in cui si riportano i valori relativi alla colonizzazione dei diversi litotipi nei due periodi di immersione.

CAPITOLO VI

INDAGINI DIAGNOSTICHE APPLICATE A PROVINI LAPIDEI IMMERSI IN AMBIENTE MARINO

6.1 Caso studio: Parco Archeologico Sommerso di Baia (Napoli)

L'archeologia subacquea ha messo a diretto contatto gli studiosi con il patrimonio archeologico sommerso, questa possibilità naturalmente ha comportato anche la necessità di confrontarsi con il problema della conservazione dei beni recuperati (è noto la complessità del trattamento e della musealizzazione dei reperti di provenienza marina).

Il problema della protezione dei reperti *in situ* è stato affrontato in questi anni tenendo conto della raccomandazione dell'Unesco del 2001, la quale suggerisce di valorizzare, proteggere e conservare *in situ* il patrimonio culturale subacqueo. Nel 2003, si assiste nel Parco Archeologico Sommerso di Baia, a cura dell'ISCR, ad una sperimentazione di restauro sott'acqua, con l'utilizzo di malte.

Nel Parco Archeologico di Baia sono state condotte indagini diagnostiche sui popolamenti di fitobentos e zoobentos presenti su malte mediante osservazioni macroscopiche e indagini di laboratorio.

Tali indagini hanno fornito dati interessanti per la definizione degli interventi di manutenzione programmata che si rendono necessari per una ottimale conservazione dei manufatti dopo gli interventi di restauro.

Al fine di valutare le forme di degrado provenienti dall'ambiente marino di Baia su campioni di malte sono stati preparati dei provini, immersi e recuperati dopo 12 mesi di immersione. Sono state utilizzate



Fig. 89 - Provini di materiale lapideo artificiale immersi a Baia

due tipologie di malte a partire da calce aerea; una tipologia è stata resa idraulica mediante l'aggiunta di cocchiopesto.

L'allestimento dei provini è stato effettuato dall'ISCR e, più precisamente, dal Nucleo per gli interventi di Archeologia Subacquea, nell'ambito degli studi relativi alla caratterizzazione delle alterazioni dei materiali lapidei sommersi all'interno di un progetto dal seguente titolo: *Progetto sperimentale "Restaurare sott'acqua: materiali, metodologie e tecniche" dell'ISCR: le ultime esperienze condotte a Baia (Na)*.

TIPOLOGIA DI MATERIALE	SIGLA	TEMPO DI IMMERSIONE	CONDIZIONI ESPOSITIVE IN MARE
MALTA	C1	1 anno	scoperti
MALTA	C2	1 anno	scoperti
MALTA	C3	1 anno	scoperti
MALTA	C5	1 anno	scoperti
MALTA	C6	1 anno	scoperti
MALTA	C7	1 anno	scoperti

Fig. 90 - Tabella riassuntiva dei materiali lapidei artificiali immersi a Baia

6.2 Analisi petrografica dei campioni immersi per un anno nell'Area Marina di Baia

6.2.1 Campione C1

Il campione in esame è una malta. Il legante della sezione si presenta di colore grigio scuro ed è interessato sia da una porosità primaria, con pori di diverse dimensioni, che secondaria legata probabilmente a processi di degrado.

L'aggregato è costituito sia da specie mineraliche che da frammenti di rocce. Tra i minerali abbiamo microclino, plagioclasti, quarzo, muscovite, pirosseni, biotite; tra i frammenti di roccia sono presenti inclusi metamorfici.

L'aggregato presenta forme da subangolose a subarrotondate con distribuzione granulometrica polimodale.

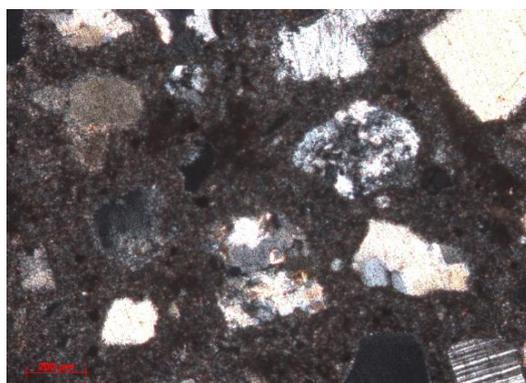


Fig. 91 - Legante di colore grigio scuro con aggregato

6.2.2 Campione C2

Il legante della sezione si presenta di colore giallognolo. E' interessato da porosità primaria e secondaria; sono evidenti sistemi di fratturazione e porzioni di dissoluzione.

L'aggregato è costituito sia da specie mineraliche che frammenti di cocciopesto e pomici.

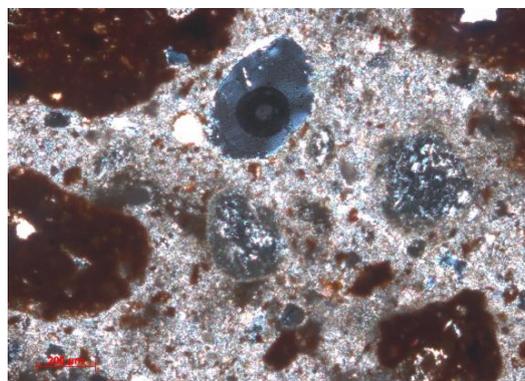


Fig. 92 - Legante di colore giallognolo con aggregato cocciopesto

6.2.3 Campione C3

Il campione in esame è una malta costituita da un legante giallognolo abbastanza poroso. Sono riconoscibili pori di forma subsferica, assimilabili probabilmente ad una porosità primaria e pori di

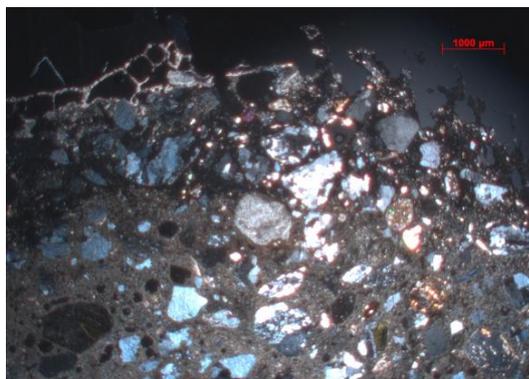


Fig. 93 - Legante di colore giallognolo con aggregato e interfaccia substrato-patina

forma irregolare legati probabilmente a processi di degrado secondari. L'aggregato è costituito da singole specie mineraliche e da frammenti di roccia di diversa tipologia con forme da sub-arrotondate a sub-angolose. Tra le specie minerali abbiamo: quarzo, pirosseno, muscovite, quarzo policristallino. Fra i frammenti di roccia si riconoscono: rocce granitoidi e rocce metamorfiche. Il campione è costituito, dal punto di vista granulometrico, da un aggregato polimodale ed inoltre è scarsamente classato.

6.2.4 Campione C5

Il campione in esame è una malta costituita da un legante giallognolo abbastanza poroso. Sono riconoscibili pori di forma subsferica, assimilabili probabilmente ad una porosità primaria e pori di forma irregolare legati probabilmente a processi di degrado secondari.

L'aggregato è costituito da singole specie mineraliche e da frammenti di roccia di diversa tipologia con forme da sub-arrotondate a sub-angolose.

Tra le specie minerali abbiamo: quarzo, plagioclasti, muscovite, quarzo policristallino e biotite.

Fra i frammenti di roccia si riconoscono rocce granitoidi e rocce metamorfiche.

Il campione è costituito, dal punto di vista granulometrico, da un aggregato polimodale ed è scarsamente classato

6.2.5 Campione C6

Il legante della sezione, che si presenta di colore giallognolo, è interessato da porosità primaria e secondaria; sono evidenti sistemi di fratturazione e porzioni di dissoluzione.

L'aggregato è costituito sia da specie mineraliche che frammenti di cocciopesto.

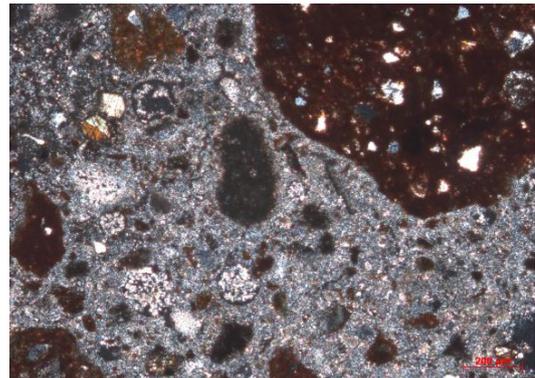


Fig. 94 - Legante di colore giallognolo con aggregato: cocciopesto

6.2.6 Campione C7

Il legante della sezione si presenta di colore bruno-giallognolo ed è interessato sia da porosità primaria che secondaria.

L'aggregato è costituito sia da singole specie minerali che da frammenti di roccia, entrambi con distribuzione granulometrica polimodale e forme da sub-arrotondate a sub-angolose.

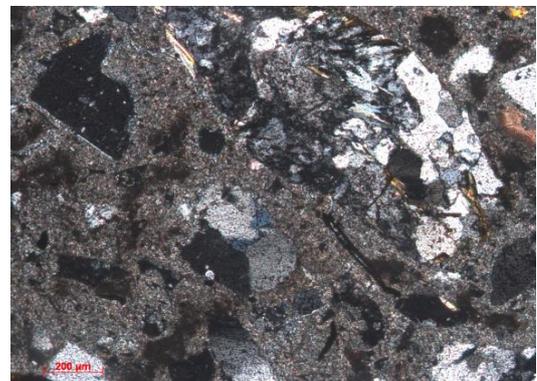


Fig. 95 - Legante di colore bruno-giallognolo con aggregato

6.3 Osservazioni allo stereomicroscopio

Questa indagine ha interessato tutti i provini (C1,C2,C3,C5,C6,C7) ciascuno dei quali è stato osservato su tutti i lati (6 lati per provino).

Ogni lato è stato suddiviso in livelli, raffigurati su carta attraverso l'uso di una scheda (creata e disegnata per l'occasione), per una rapida mappatura e corredata da una documentazione fotografica (allegato N).

Nella scheda vengono riportate delle informazioni relative al campione, ai mesi di immersione e delle note inerenti le osservazioni fatte allo strumento per ogni lato del campione. Sulle note viene segnalata la presenza dei vari biodeteriogeni presenti sui diversi lati, ottenendo una stima dell'abbondanza dei diversi biodeteriogeni che si sono sviluppati.

The form is titled 'CAMPIONE' and includes the following sections:

- Top Right:** A field for 'Data'.
- Left Side:** A section for 'LATO' with checkboxes for 'SUP', 'INF', 'DX', 'SX', 'SUP LAT', and 'INF LAT'. Below this is a 3D diagram of a rectangular sample with labels for 'superiore laterale', 'superiore', 'inferiore laterale', and 'inferiore'.
- Center:** A section for 'MESI DI IMMERSIONE' followed by a 5x4 grid of boxes labeled '5° LIVELLO', '4° LIVELLO', '3° LIVELLO', '2° LIVELLO', and '1° LIVELLO'.
- Right Side:** A list of checkboxes: 'COLONIZZAZIONE ANIMALE', 'COLONIZZAZIONE VEGETALE', 'SOTTIFELO', and 'SCOPERTO'.
- Bottom Left:** A large text area labeled 'NOTE'.
- Bottom Center:** A small toolbar with icons for 'Stampa', 'Copia', 'Incolla', and 'Elimina'.

Fig. 96 - Scheda per il campionamento

6.4 Risultati dell'osservazione allo stereomicroscopio della serie di provini immersi 1 anno

La serie è rappresentata da sei provini lapidei di materiale lapideo artificiale (malte) siglati come C1, C2, C3, C5, C6, C7, i quali sono stati immersi in mare per un periodo di un anno.

Dalla semplice osservazione visiva si notava già la presenza di una colonizzazione molto abbondante e una diversificazione di organismi a causa del prolungato periodo di esposizione. Su tutti i provini si è notato una abbondante presenza di Balani (che risultano, inoltre, prevalenti rispetto agli altri organismi) seguita da una rilevante crescita di Briozoi. In minore percentuale si notavano gusci di Serpulidi e scheletri di vermi marini. L'abbondanza degli organismi risultava diversa per ogni provino e per i diversi livelli di divisione.

6.5 Risultati delle osservazioni al microscopio elettronico a scansione (S.E.M.)

Si è proceduto all'allestimento di sezioni stratigrafiche lucide e sottili dai provini esaminati. Lo studio delle sezioni ha permesso di valutare il degrado chimico-fisico del substrato in relazione all'attacco biologico e di osservare le eventuali crescite di specie endolitiche.

Le analisi morfologiche al S.E.M. hanno permesso sia di individuare le specie biologiche, sia di determinare le forme di degrado (allegato M).

6.5.1 Serie di provini 1 anno immersi scoperti (C1, C2, C3, C5, C6, C7)

Il provino C1 si presenta molto degradato e con numerose precipitazioni di sali. Si notano numerosi serpulidi e, per tutta la superficie, una ricristallizzazione di calcite.

Il provino C2 presenta numerosi talli algali incrostanti, serpulidi e briozoi. Sono state osservate inoltre spicole di spugne endolitiche sulla superficie.

Il provino C3 presenta la superficie ricca di colonizzazione animale, balani, serpulidi e briozoi.

La superficie si presenta forata con la presenza di qualche spicola.

Il provino C5 presenta diverse forme di spicole appartenenti a differenti spugne; vi sono balani, serpulidi, briozoi e talli incrostanti.

Il provino C6 presenta diverse forme di spicole. Vi sono balani, serpulidi, briozoi e talli incrostanti.

Il provino C7 presenta diverse forme di spicole che confermano una colonizzazione di diverse spugne. Si riconoscono balani, serpulidi, briozoi, talli incrostanti.



Fig. 97 - Concrezione calcarea osservata al S.E.M.

6.6 Analisi del degrado

Al fine di valutare le forme di degrado provenienti da ambiente marino su campioni artificiali di malte, sono stati immersi per un anno 6 campioni di diversa tipologia nel sito archeologico marino di Baia.

In particolare, per osservare eventuali differenze di degrado, sono state utilizzate malte con impasto differente, alcune non idrauliche ed altre rese idrauliche mediante l'aggiunta di appositi aggregati (cocciopesto e pomici).

6.6.1 Campione C1

Dal punto di vista del degrado, su tale campione è evidente una patina superficiale con distribuzione omogenea sia sulla superficie che sui lati (Fig.98a e 98b).

Lo spessore è abbastanza omogeneo; la morfologia, invece, segue il substrato e ne determina una forte fratturazione. Sono evidenti infatti delle compenetrazioni all'interno del substrato.

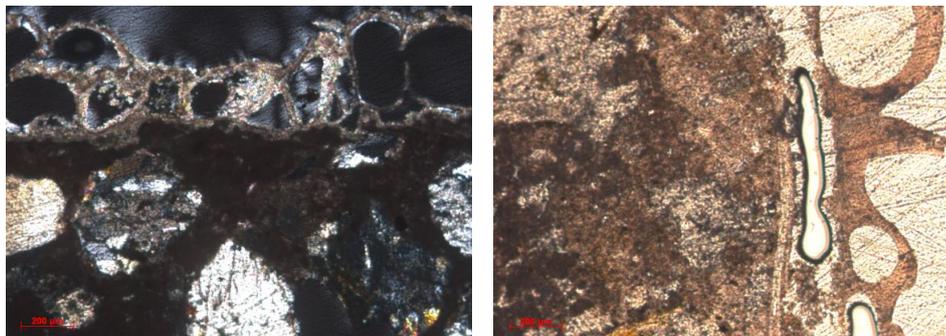


Fig.98 - (a) *Interfaccia substrato-patina con compenetrazioni*; (b) *particolare interfaccia substrato-patina*

6.6.2 Campione C2

Dal punto di vista del degrado è evidente una patina omogenea con spessore variabile. La morfologia segue il substrato, non si osservano fratture nel substrato sottostante o compenetrazioni evidenti, tranne che in poche porzioni (Fig.99a, 99b, 99c).

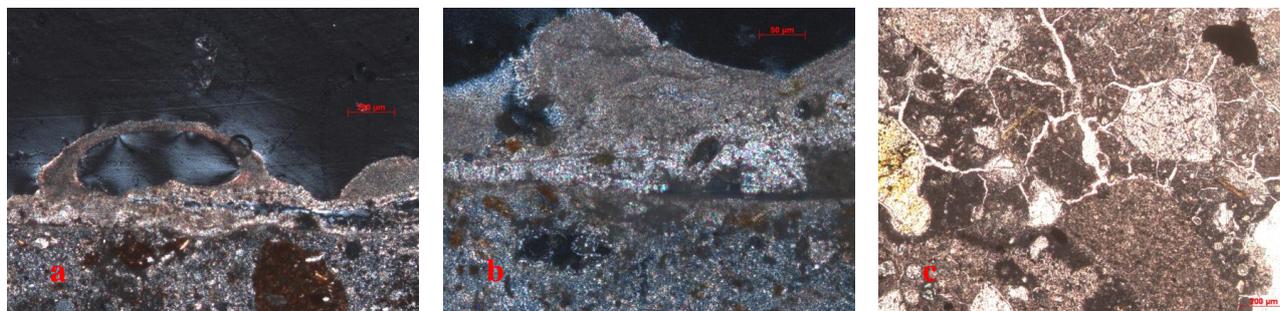


Fig. 99 - (a) *interfaccia substrato-patina con zone di compenetrazione*; (b) *interfaccia substrato-patina*, (c) *legante fratturato sotto la patina*

6.6.3 Campione C3

Dal punto di vista della conservazione, la patina superficiale è ben sviluppata e si presenta abbastanza spessa. Oltre che sulla superficie è presente anche sui lati, in cui si notano delle compenetrazioni all'interno del campione, in maniera particolare nel legante.

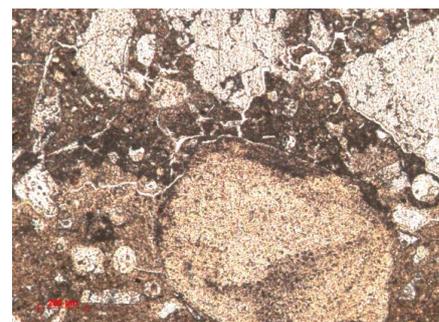


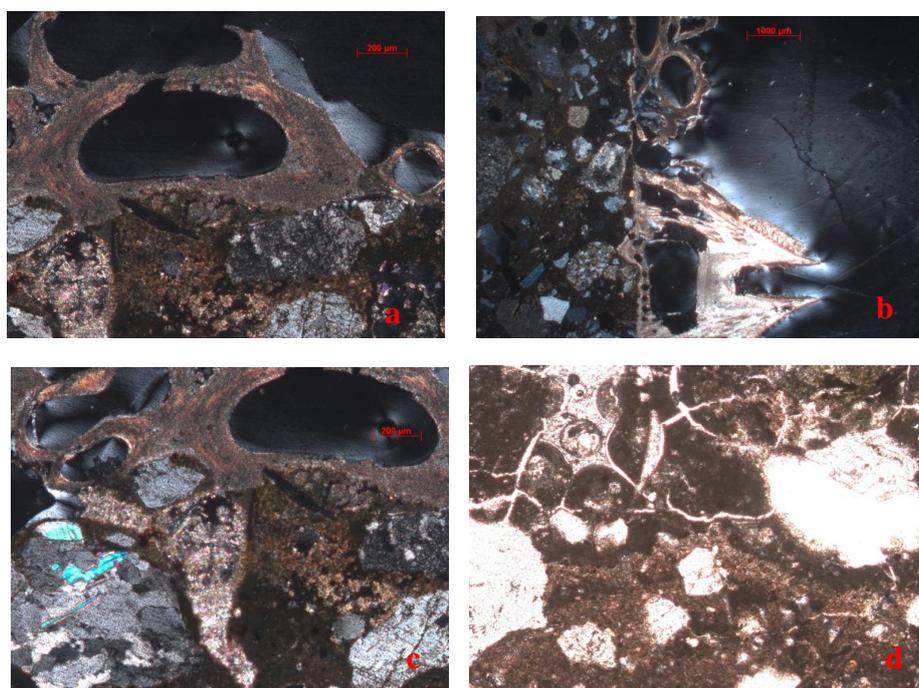
Fig. 100 - *Legante fratturato sotto la patina*

La porzione di campione su cui si sviluppa la patina è fortemente interessata da fratturazioni a carattere pervasivo (contatto tra porzione degradata e non degradata).

6.6.4 Campione C5

Dal punto di vista della conservazione, la patina superficiale è ben sviluppata, si presenta abbastanza spessa, oltre che sulla superficie è presente anche sui lati in cui si notano delle compenetrazioni all'interno del campione, in maniera particolare nel legante (Fig.101).

La porzione di campione su cui si sviluppa la patina è fortemente interessata da fratturazioni a carattere pervasivo (contatto tra porzione degradata e non degradata).



*Fig. 101 – (a,b,c) interfaccia sustrato-patina con evidenti compenetrazioni nel substrato;
(d) legante fratturato al di sotto della patina*

6.6.5 Campione C6

Dal punto di vista del degrado è evidente una patina superficiale che, come nel caso precedente, provoca nel legante sottostante un'evidente sistema di fratturazione.

In alcune porzioni sono evidenti delle compenetrazioni all'interno del substrato (Fig.102).

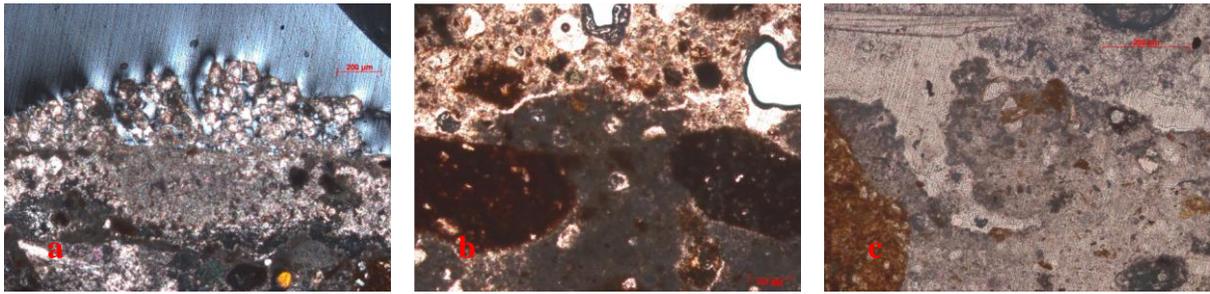


Fig. 102 - (a, b, c) interfaccia substrato-patina con compenetrazioni

6.6.6 Campione C7

Dal punto di vista del degrado è evidente la presenza di una patina con sviluppo omogeneo e spessore costante. Oltre che sulla superficie, si sviluppa anche sui lati del campione.

Sono evidenti, inoltre, compenetrazioni all'interno del substrato lapideo.

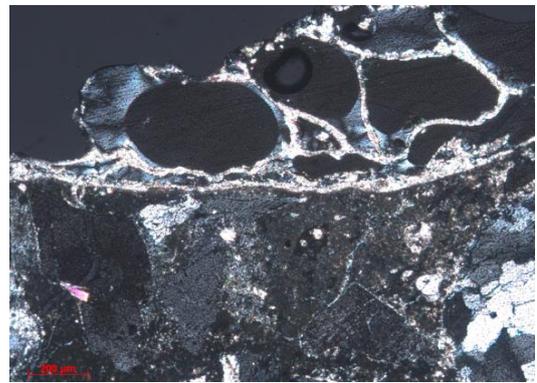


Fig. 103 - interfaccia substrato-patina

6.7 Considerazioni conclusive

Dal punto di vista biologico, si è notato come gli organismi epilitici hanno portato alla formazione di dense e spesse incrostazioni calcaree. Gli organismi epilitici rinvenuti sono crostacei bentonici del genere *Balanus* spesso associati ai Serpulidi e a Molluschi epilitici dei generi *Ostrea* ed alla specie *Anomia ephippium*, ed i briozoi.

I Serpulidi (Policheti Sedentari) sono ricondotti ai generi *Spirobis* e *Serpula* formanti incrostazioni biancastre di forma allungata.

Interessante da notare è stata la presenza di Spugne (in particolare *Cliona Celata*) che hanno provocato diffuse alterazioni; in alcuni casi si è evidenziato il fenomeno del pitting sui provini lapidei artificiali.

Dalla valutazione del degrado riscontrato sui diversi provini di malta è risultata evidente una differenza tra le malte rese idrauliche (mediante l'aggiunta di appositi aggregati) e le malte non idrauliche.

In particolare, le malte non idrauliche hanno presentato, dal punto di vista del degrado, una patina ben sviluppata, abbastanza spessa, presente oltre che sulla superficie, anche sui lati, con compenetrazioni all'interno del legante. Inoltre, si sono notate porzioni fortemente interessate da fratturazioni a carattere pervasivo.

Le malte idrauliche invece, pur presentando patine dovute al degrado marino, non hanno determinato evidenti e pervasive fratturazioni o compenetrazioni (apprezzabili solo in alcune zone).

Da ciò si deduce come l'aggiunta di aggregato (che conferisce caratteristiche idrauliche alla malta) preservi maggiormente la malta meno compromessa dal punto di vista conservativo, dal degrado stesso.

CAPITOLO VII

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La presente tesi ha rappresentato il primo approccio di tipo minero-petrografico e biologico applicato allo studio dei materiali lapidei naturali ed artificiali degradati in ambiente marino.

Le indagini eseguite mediante l'approccio biologico applicato allo studio conservativo di reperti e provini lapidei naturali e artificiali hanno permesso di definire le diverse tipologie nonché l'entità del degrado biologico con particolare riferimento ai tipi di organismi, alla loro velocità e variabilità di colonizzazione sui diversi materiali.

L'approccio minero-petrografico, oltre a fornire utili indicazioni riguardo alle caratteristiche mineralogiche e microstrutturali dei materiali, è stato determinante per le problematiche riguardanti sia i fenomeni di alterazione e degrado riscontrati sulle diverse tipologie di materiali, sia gli aspetti puramente conservativi.

In particolare, nel caso dello studio dei reperti archeologici rinvenuti a Crotona si è notato come l'ambiente subacqueo determini fenomeni di degrado fisico, dovuto alle concrezioni calcaree attribuibili sia ad organismi epilitici che endolitici.

Interessante è stato rilevare la presenza di forme endolitiche da attribuire al Phylum Porifera (Spugne) ed in particolare quelle riconducibili al genere *Cliona* che ha svolto un ruolo importante nei processi di degrado dei reperti, determinando del micropitting.

I provini di materiale lapideo naturale e artificiale invecchiati e immersi nell'ambiente marino di Crotona hanno messo in evidenza, già dopo 3 mesi, la formazione di uno spesso biofilm (costituito da cianobatteri, microalghe e diatomee) di aspetto gelatinoso e spessore variabile, sul quale si impiantavano, successivamente, macroalghe e organismi animali incrostanti, tra cui Briozoi e specie epilitiche di Bivalvi.

Il degrado esercitato dalle specie epilitiche, pur limitandosi alle superfici del materiale lapideo, consiste soprattutto in antiestetiche alterazioni cromatiche delle superfici interessate dall'azione debolmente corrosiva di alcuni prodotti del metabolismo cellulare.

Dopo immersione per 12 mesi, è stato possibile apprezzare sui provini, in funzione della loro tipologia, un evidente sviluppo di forme di degrado epilitiche.

Le diverse forme di degrado sono riconducibili soprattutto alle incrostazioni dovute a diverse specie di alghe: *Caulerpa racemosa*, *Corallina elongata*, *Dictyota dichotoma*, *Halimeda tuna*, *Jana rubens*, *Lithopyllum sp.*, *Padina pavonia*, *Peyssonnelia squamaria*, *Udotea petiolata*.

Per quanto riguarda i dati relativi al degrado dei materiali lapidei artificiali, immersi nel sito di Baia, è stato interessante notare come le malte rese idrauliche siano risultate meno attaccabili dal punto di vista del degrado rispetto a quelle non idrauliche.

Sui provini immersi per 12 mesi, i livelli di crescita e di degrado fisico più evidenti sono risultati correlati alle Rhodophyceae, o Alghe Rosse, alle Phaeophyceae (Alghe Brune) ed infine alle Chlorophyceae o Alghe verdi.

Particolarmente invasivo è risultato lo sviluppo dello zoobentos presente. Nell'ambito del *Phylum Porifera* (Spugne) sono state riscontrate specie epilitiche ed endolitiche, come il genere *Cliona*, che hanno provocato all'interno del materiale cavità sotto forma di micropitting. Gli organismi animali che ricoprivano la superficie dei provini sono riconducibili a diversi gruppi sistematici come Serpulidi e Bivalvi, che hanno formato numerose incrostazioni.

I risultati ottenuti hanno, infatti, consentito di formulare una proposta di protocollo-guida per ciò che concerne la diagnostica e conservazione di reperti rinvenuti in mare.

I risultati raggiunti da questa ricerca possono avere un'importante ricaduta nella conservazione dei Beni Culturali in quanto hanno permesso non solo di caratterizzare le forme e le cause dei processi d'alterazione e degrado, ma anche di mettere a punto metodologie e procedure finalizzate allo studio della dinamica di colonizzazione dei substrati. Le metodologie sperimentate permettono inoltre, se applicate su manufatti archeologici restaurati e lasciati in ambiente sommerso, di verificare nel tempo l'efficacia e la durata degli interventi conservativi e di pulitura.

ALLEGATI

ALLEGATO A

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA MEDIANTE STEREOMICROSCOPIO DI ALCUNI FRAMMENTI DI REPERTI ARCHEOLOGICI



Fig. 1 - Presenza di fori dovuti a *Cliona*; filamenti di alghe rosse ed incrostazioni presenti sul reperto A1



Fig. 2 - Presenza di incrostazioni sul reperto A2



Fig. 3 - Spugna sul reperto A3



Fig. 4 - Incrostazione di briozoi sul reperto A4



Fig. 5 - Foro di litodomo sul reperto MA1



Fig. 6 - Perforazioni sul reperto MA



Fig. 7 - Incrostazioni di talli algali incrostanti sul reperto MA3



Fig. 8 - Presenza di alghe incrostanti e serpulidi sul reperto LB1



Fig. 9 - Colonizzazione di alghe incrostanti e serpulidi a chiocciola sul reperto LB2



Fig. 10 - Presenza di alghe tallose di colore bruno e alghe incrostanti sul reperto LB3



Fig. 11 - Fori di *Cliona* sul reperto LB4



Fig. 12 - Alghe incrostanti sul reperto LB5



Fig. 13 - Alterazione dovuta ad alghe incrostanti sul reperto LB



Fig. 14 - Concrezioni calcaree di serpulidi sul reperto LA

ALLEGATO B

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA MEDIANTE SEM DI ALCUNI FRAMMENTI DI REPERTI ARCHEOLOGICI

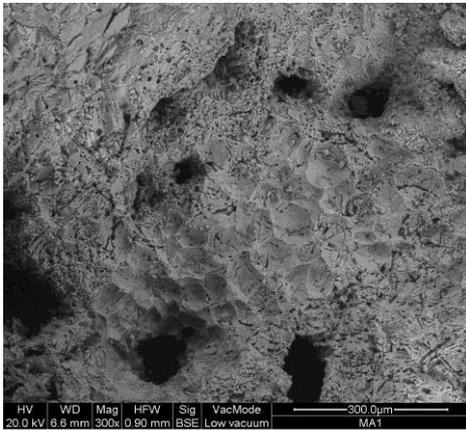


Fig. 1 - Impronte sul reperto MA1



Fig. 2 - Spicole demospongie sul reperto MA2

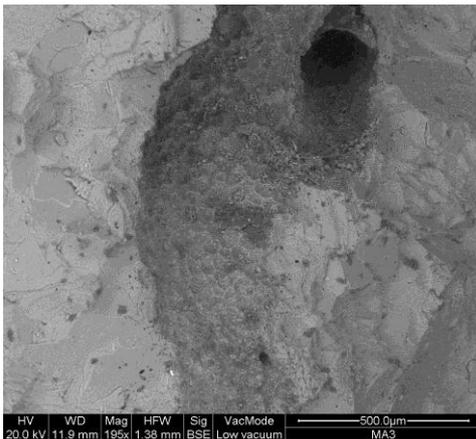


Fig. 3 - Galleria e impronte di *Cliona* sul reperto MA3

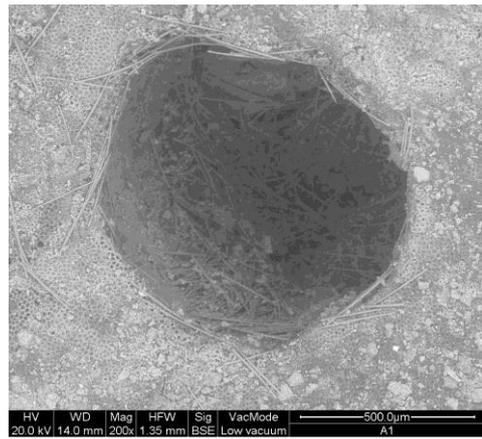


Fig. 4 - Cavità con spicole sul reperto A1

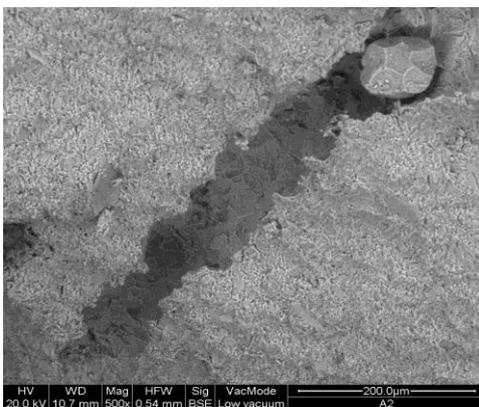


Fig. 5 - Galleria all'interno del reperto A2

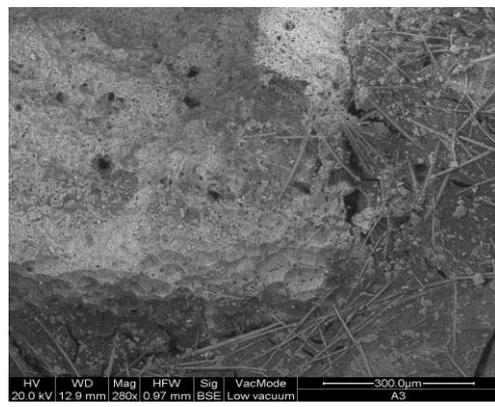


Fig. 6 - Spicole sul reperto A3

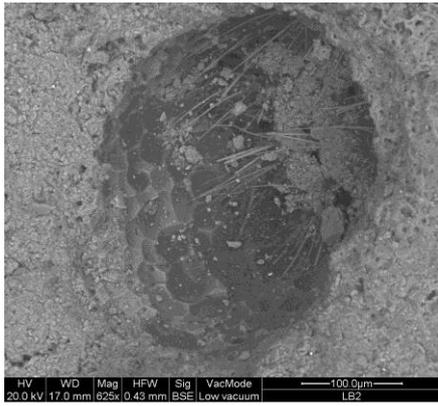


Fig. 9 - Spicole sul reperto LB2

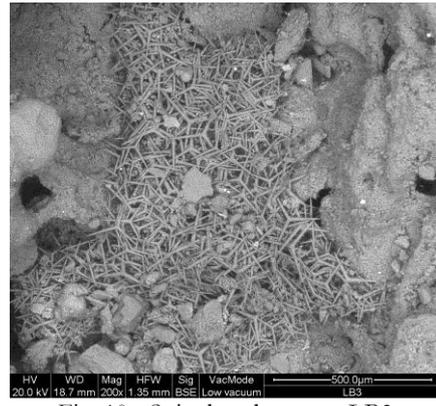


Fig. 10 - Spicole sul reperto LB3

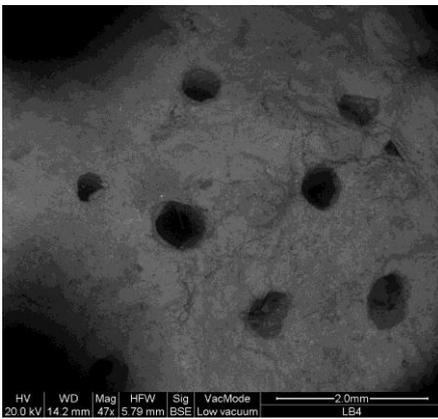


Fig. 11 - Microboring sul reperto LB4

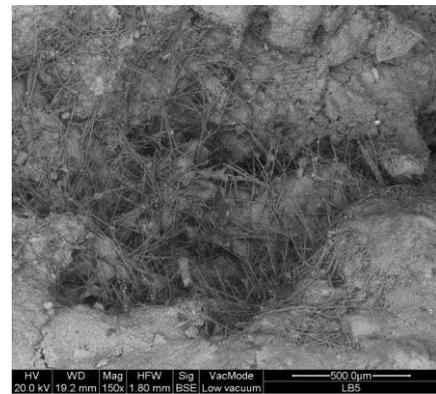


Fig. 12 - Spicole demospogic sul reperto LB5

ALLEGATO C

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DEI PROVINI LAPIDEI IMMERSI NEL FONDALE MARINO



ALLEGATO D

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA SCATTATA AL MICROSCOPIO OTTICO DI ALCUNI PROVINI IMMERSI PER 3 MESI A CROTONE



Fig. 1 - Alghie eucariote presenti nel provino KF2, ingrandimento 63x

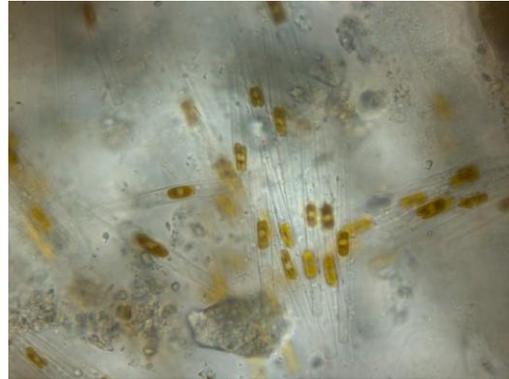


Fig. 2 - Diatomee presenti nel provino KF2, ingrandimento 63x

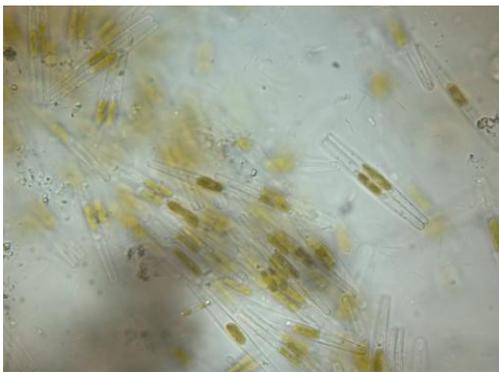


Fig. 3 - Diatomee presenti nel provino C2, ingrandimento 63x

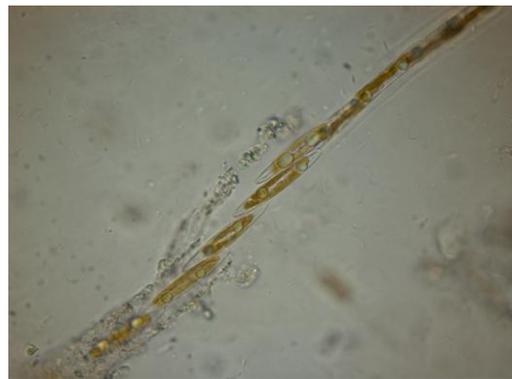


Fig. 4 - Diatomee presenti nel provino SL2, ingrandimento 63x

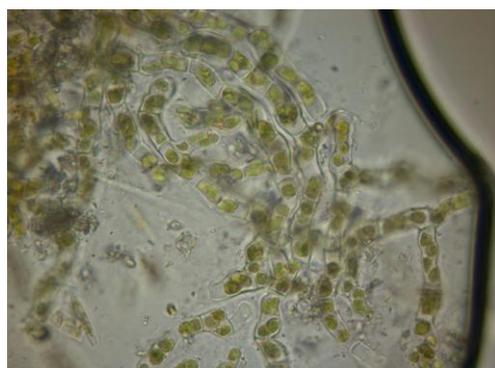


Fig. 5 - Cloroficce filamentose presenti nel campione LC2, 63x

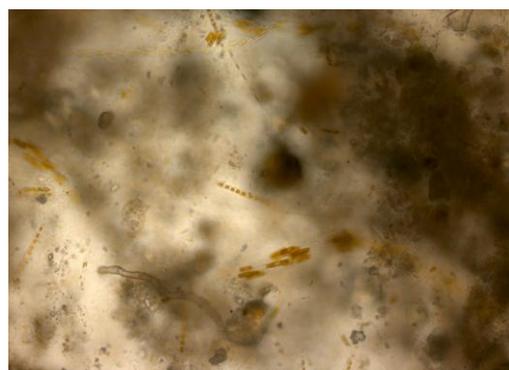


Fig. 6 - Biofilm con presenza di diatomee nel provino SG5 63x

ALLEGATO E

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA MEDIANTE OSSERVAZIONE ALLO STEREOMICROSCOPIO DI ALCUNI PROVINI DELLE SERIE 2 E 5 DOPO IL RECUPERO DI 3 MESI A CROTONE



Fig. 1- Serpulide sul provino LL2



Fig. 2 - Patine algali sul provino e serpulide LC2



Fig. 3 - Patine algali sul provino SL2



Fig. 4 - Patine e talli algali sul provino GG2



Fig. 5 - Patine algali sul provino C2



Fig. 5 - Tallo incrostante sul provino KF2



Fig. 6 - Talli algali sul provino GF2



Fig. 6- Residui organici sul provino SG5

ALLEGATO F

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA AL S.E.M. DI ALCUNI PROVINI DELLA SERIE 2 E DELLA SERIE 5 IMMERSI A CROTONE PER 3 MESI

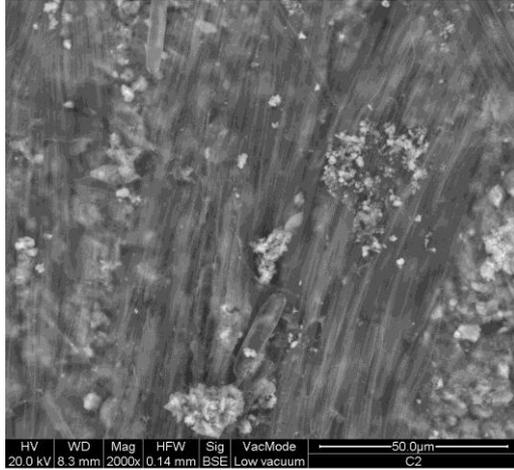


Fig. 1 - Biofilm sul provino C2

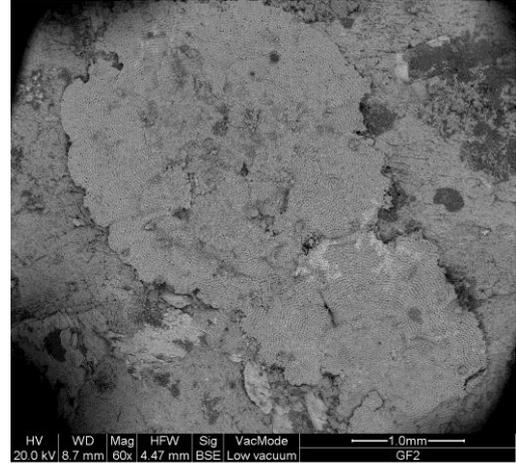


Fig. 2 - Alghe incrostanti sul provino GF2

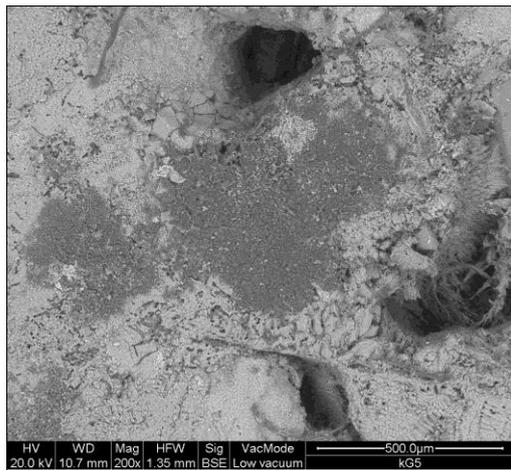


Fig. 3 - Presenza di alghe sul provino KG5

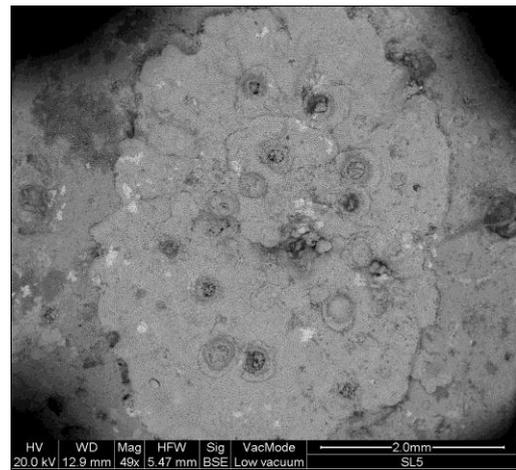


Fig. 4 - Tallo algale incrostante sul provino SL5

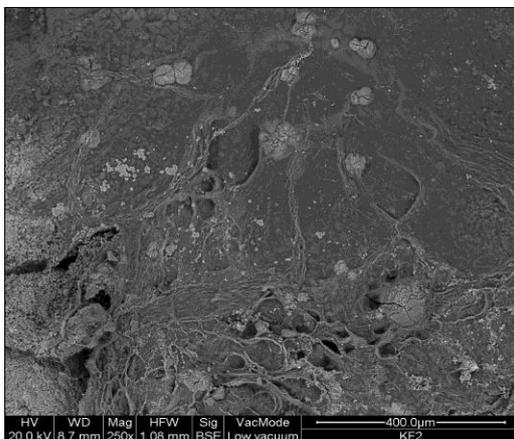


Fig. 5 - Tallo algale sul provino KF2

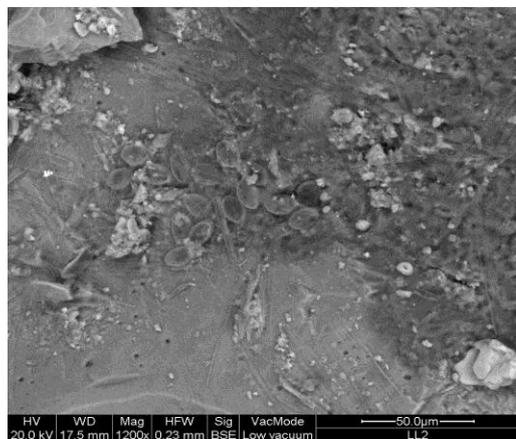


Fig. 6 - Biofilm sul provino LL2

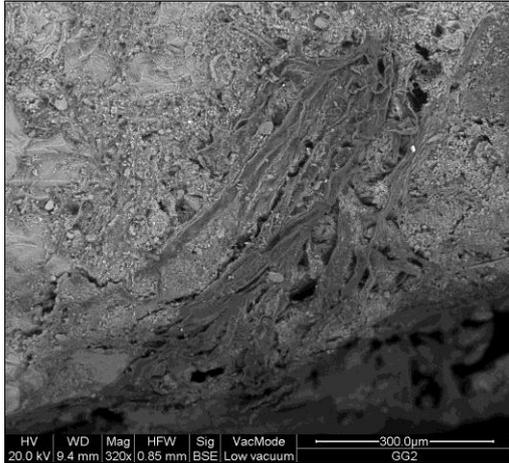


Fig. 7 - Tallo algale sul provino GG2

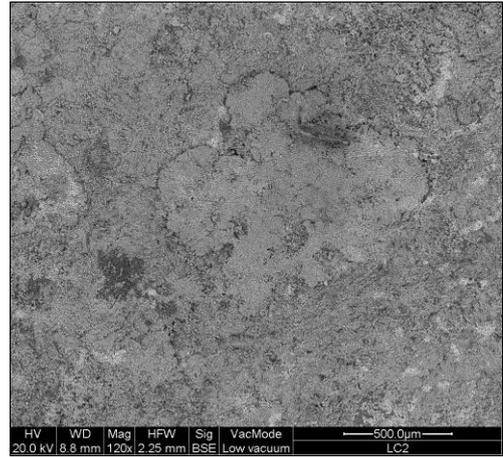


Fig. 8 - Briozoi sul provino LC2

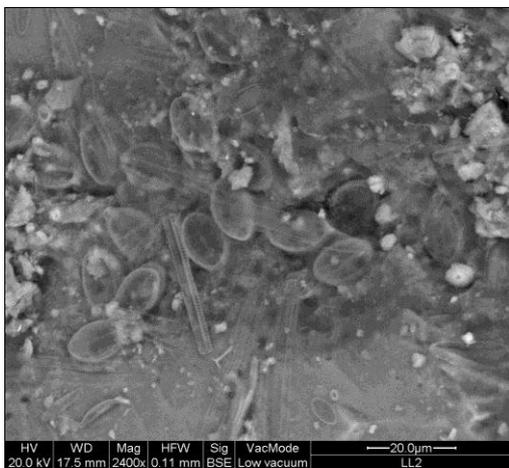


Fig. 9 - Diatomee sul provino LL2

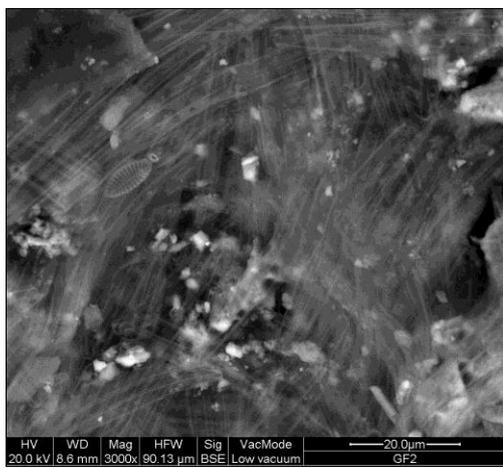


Fig. 10 - Diatomee sul provino GF2

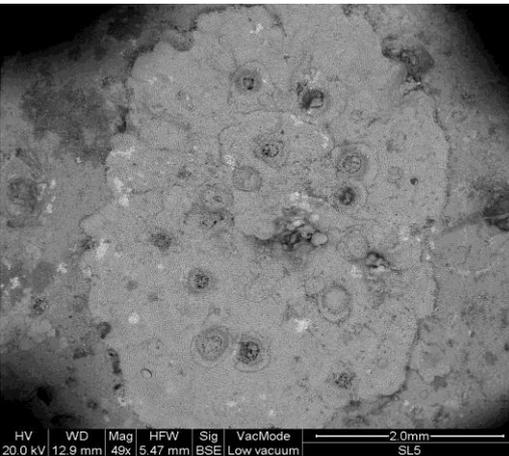


Fig. 11 - Tallo algale con ricettacoli sul provino SL5

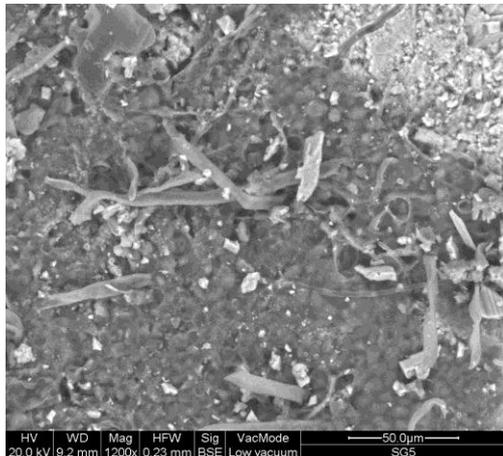
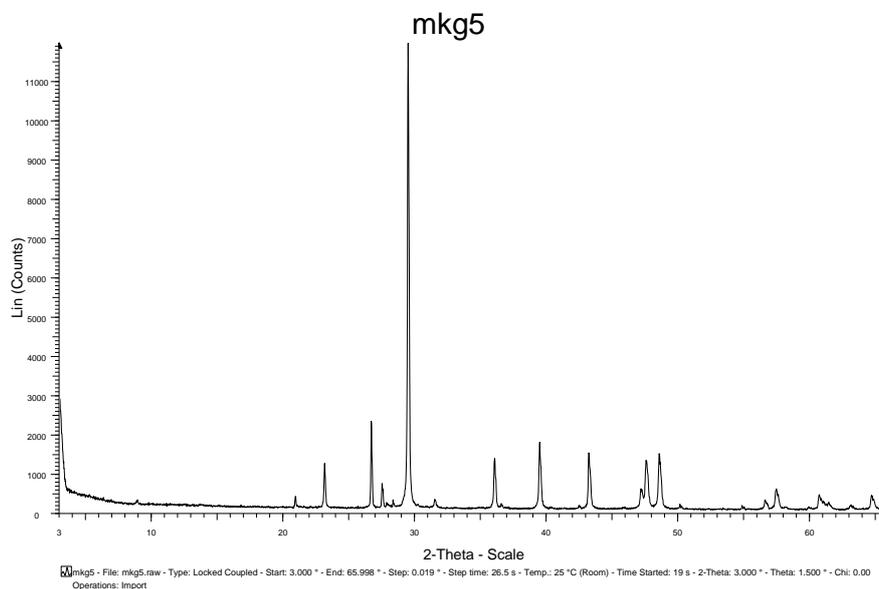
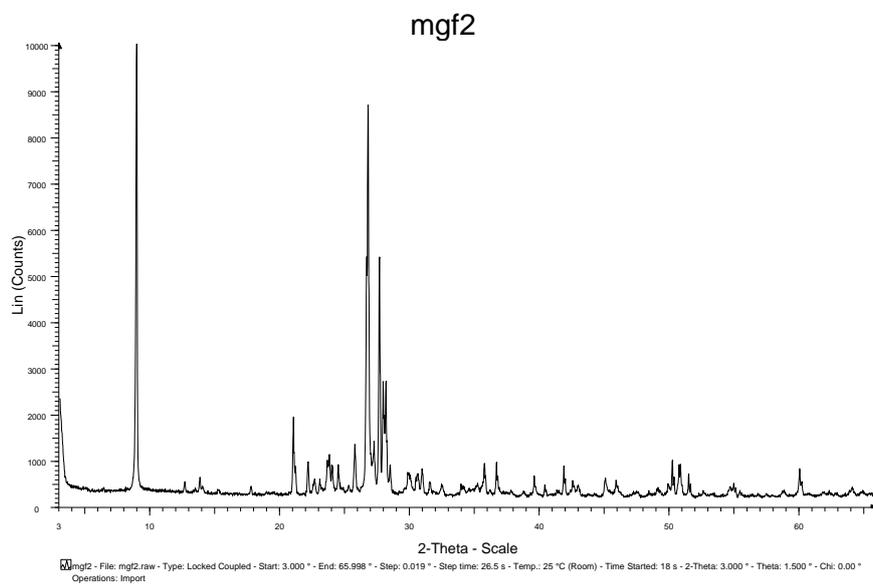
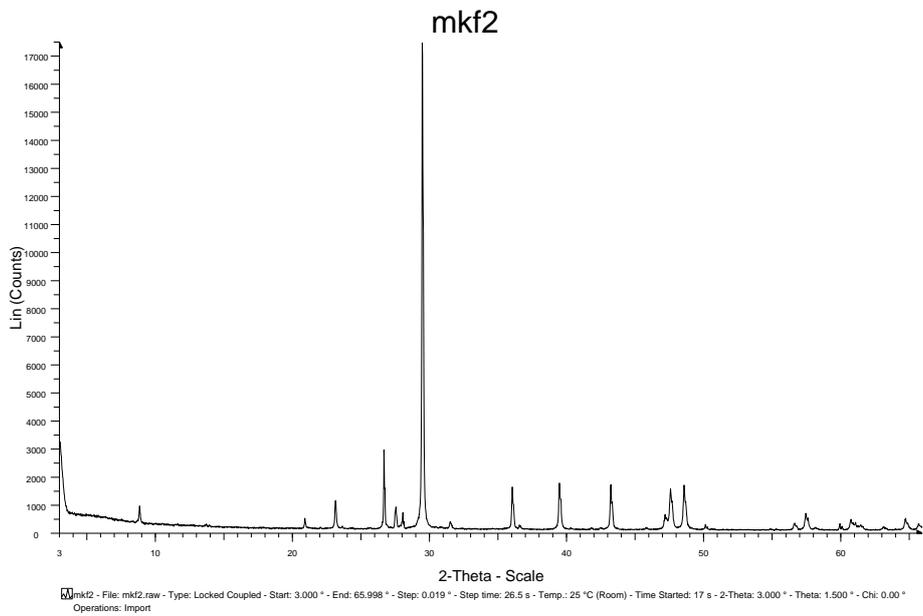
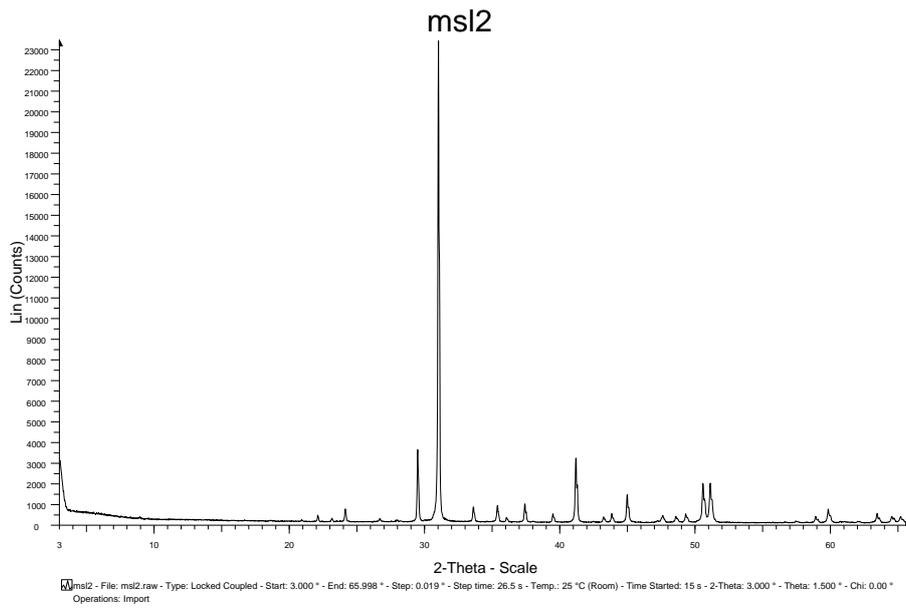


Fig. 12 - Biofilm sul provino GF5

ALLEGATO G

DIFRATTOGRAMMI ESEGUITI SU ALCUNI PROVINI IMMERSI PER 3 MESI A CROTONE





ALLEGATO H

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA SCATTATA AL MICROSCOPIO OTTICO SU ALCUNI PROVINI DOPO IL RECUPERO DI 12 MESI A CROTONE



Fig. 1 - *Udotea petiolata*



Fig. 2 - *Caulerpa racemosa*



Fig. 3 - *Corallina elongata*



Fig. 4 - *Halimeda tuna* o moneta di mare



Fig. 5 - *Lithophyllum* sp



Fig. 6 - *Padina Pavonia*



Fig. 7 - *Peyssonnelia squamaria*



Fig. 8 - *Jana rubes*



Fig. 9 - *Dictyota dichotoma*

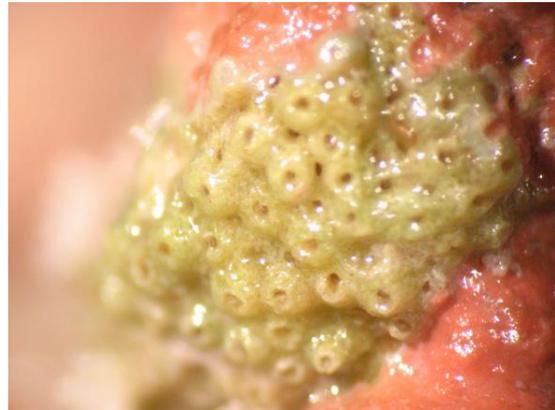


Fig. 10 *Spugna*

ALLEGATO I

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA MEDIANTE OSSERVAZIONE ALLO STEREOMICROSCOPIO DI ALCUNI PROVINI DELLA SERIE 1 E DELLA SERIE 6 DOPO IL RECUPERO DI 12 MESI A CROTONE



Fig. 1 - Presenza di talli algali incrostanti e patine algali sul provino C6



Fig. 2 - Talli algali sul provino GF6



Fig. 3 - Talli algali incrostanti con ricettacoli presenti sul provino GG6



Fig. 4 - Talli algali incrostanti sul provino KP6



Fig. 5 - Filamenti algali e talli incrostanti sul provino KG6



Fig. 6 - Patine algali sul provino SG6



Fig. 7 - Tallo algale incrostante con filamenti di alghe brune sul provino SL6



Fig. 8 - Guscio di serpulide e filamenti algali sul provino M6



Fig. 9 - Filamenti di *corallina elongata* sul provino KG1



Fig. 10 - Patina algale sul provino GG1

ALLEGATO L

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA MEDIANTE OSSERVAZIONE AL SEM DI ALCUNI PROVINI DELLA SERIE 1 E DELLA SERIE 6 DOPO IL RECUPERO DI 12 MESI A CROTONE

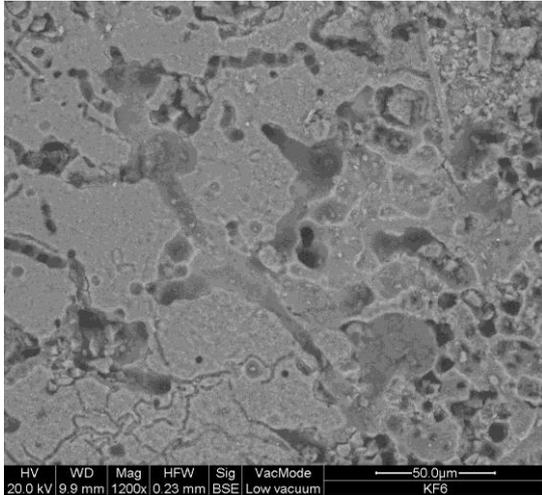


Fig. 1 - Fenomeno di microerosione sul provino KF6 dovuta ad organismi marini

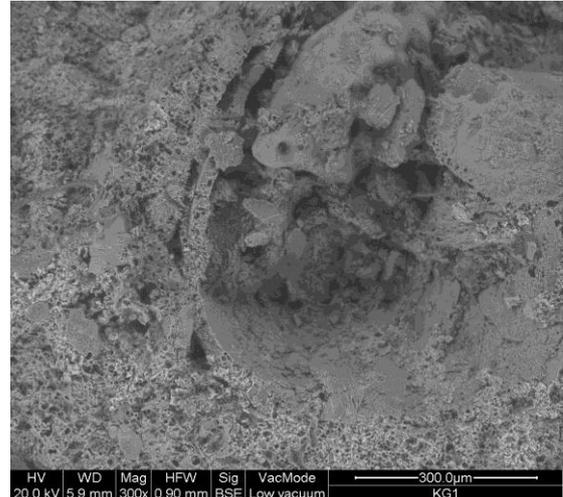


Fig. 2 - Fenomeno di microerosione sul provino KG1

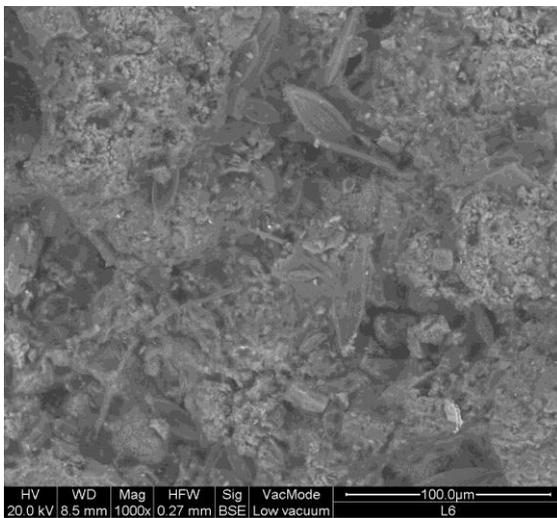


Fig. 3 - Diatomee sul provino L6

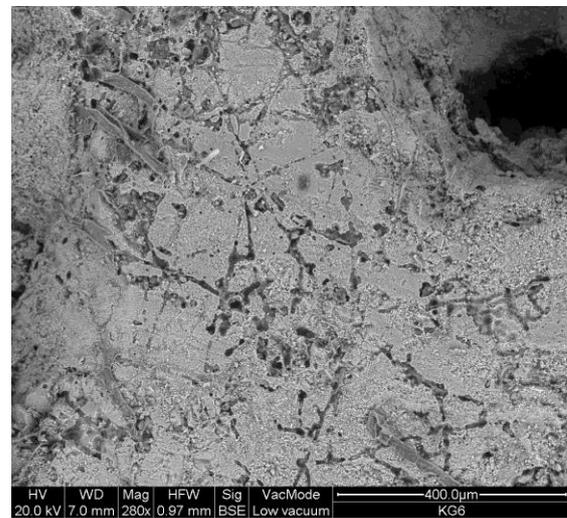


Fig. 4 - Fenomeni di microerosione sul provino KG6



Fig. 5 - Presenza di alghe e guscio calcareo sul provino C6

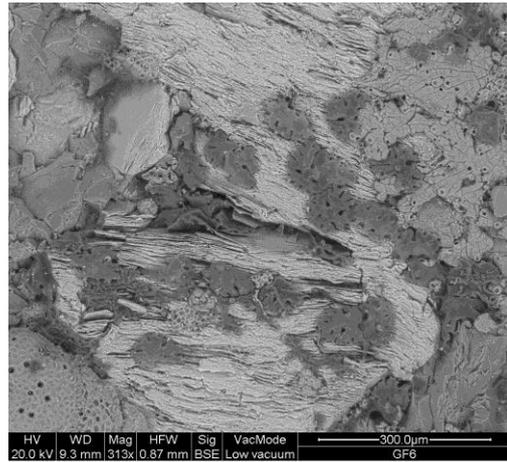


Fig. 6 - Attacco biologico sulla biotite presente nel provino GF6

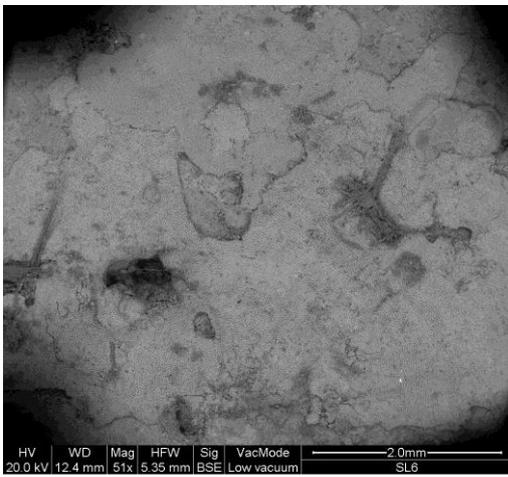


Fig. 7 - Presenza di Briozoi e talli algali incrostanti sul provino SL6

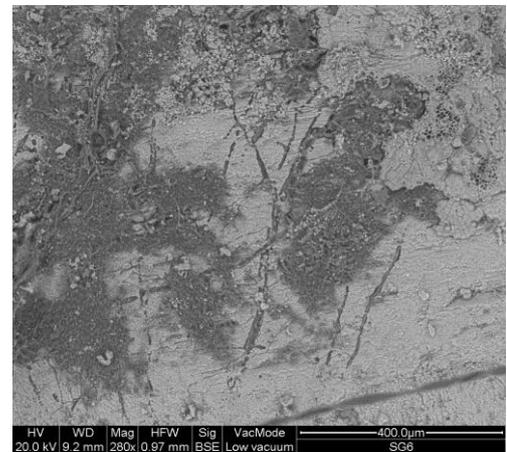
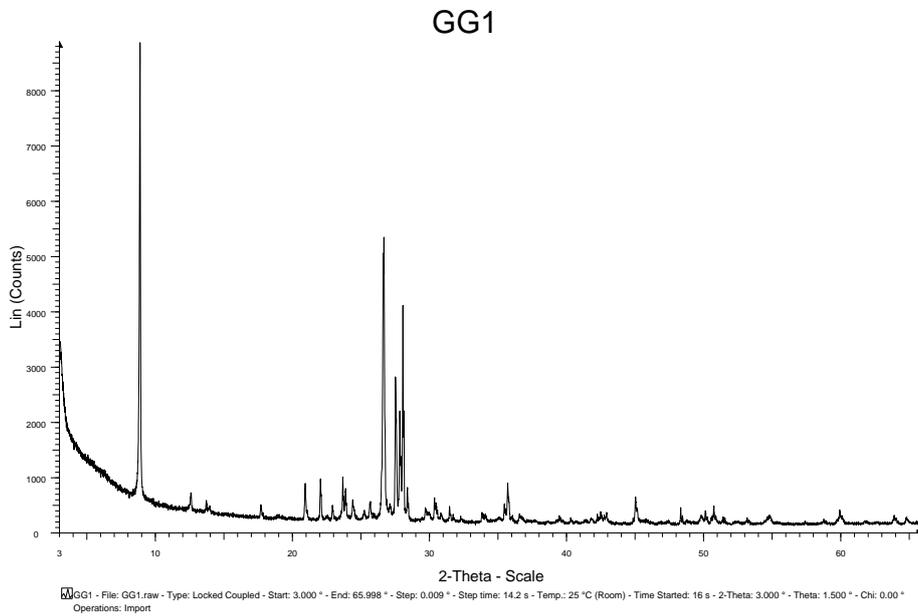
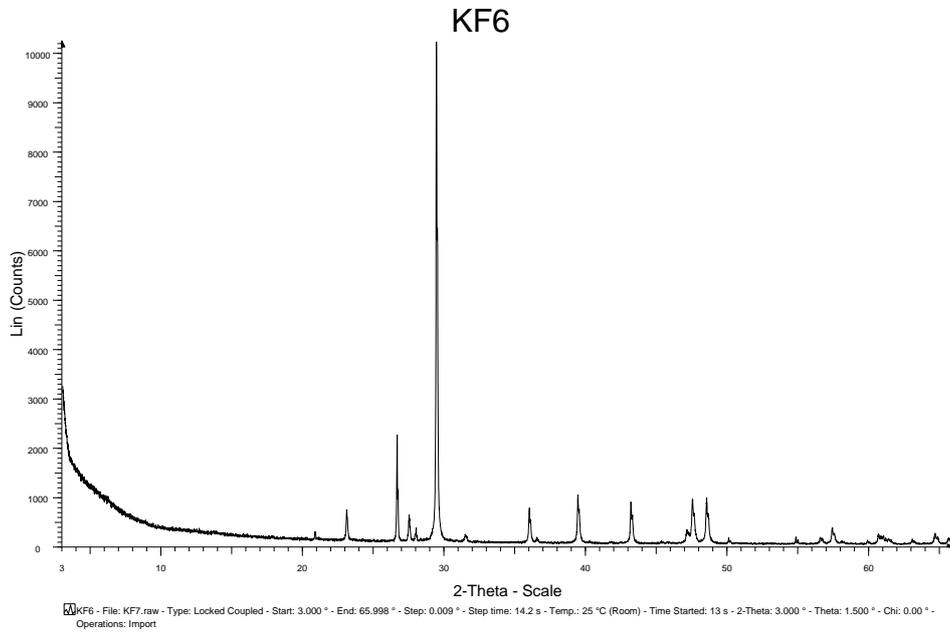
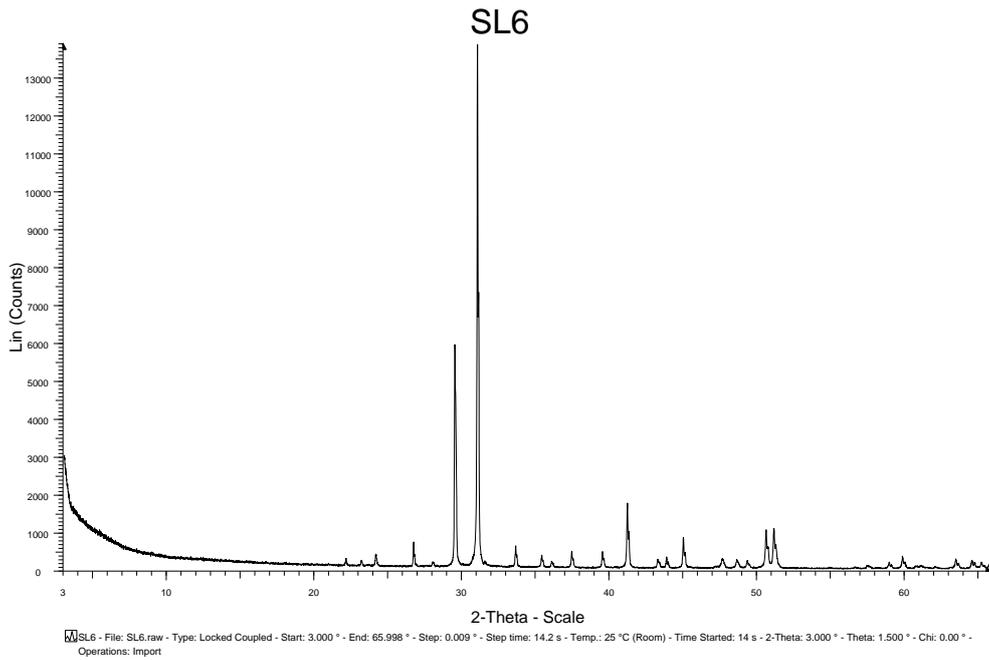
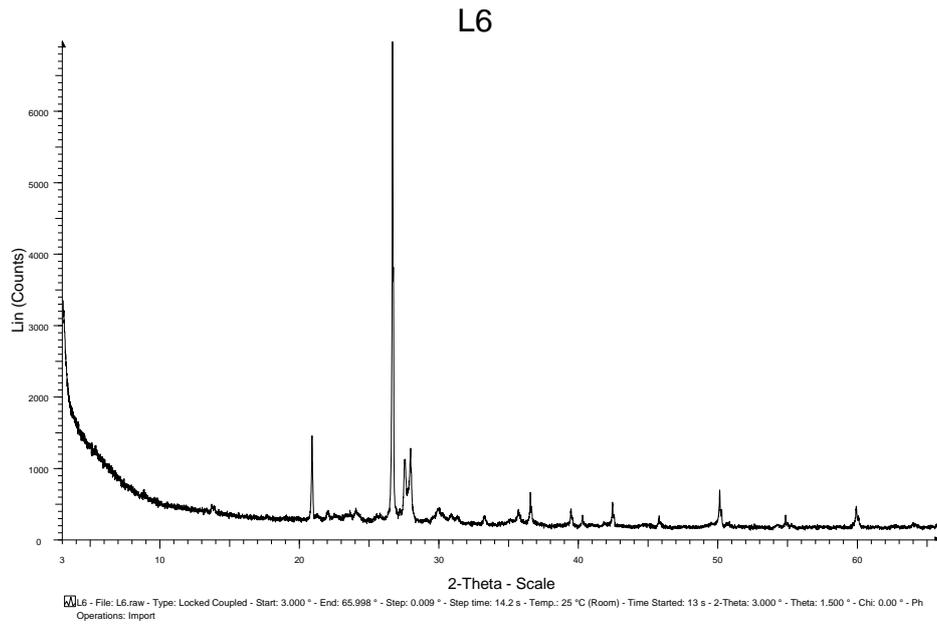


Fig. 8 - Microerosione e colonizzazione biologica sul provino SG6

ALLEGATO M

DIFFRATTOGRAMMI ESEGUITI SU ALCUNI PROVINI DI 12 MESI IMMERSI A CROTONE





ALLEGATO N

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA MEDIANTE OSSERVAZIONE ALLO STEREOMICROSCOPIO DI ALCUNI PROVINI IMMERSI 1 ANNO A BAIÀ



Fig. 1 - Briozoi e serpulidi sul provino C1



Fig. 2 - Balanidi e serpulidi sul provino C2



Fig. 3- Balanidi sul provino C3



Fig. 4 - Briozoi, balanidi e serpulidi sul provino C5



Fig. 5 - Serpulidi sul provino C6



Fig. 6 - Balanidi e serpulidi sul provino C7

ALLEGATO O

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DEI PROVINI DI 1 ANNO IMMERSI A BAIAMEDIAANTE MICROSCOPIO ELETTRONICO A SCANSIONE (S.E.M.)

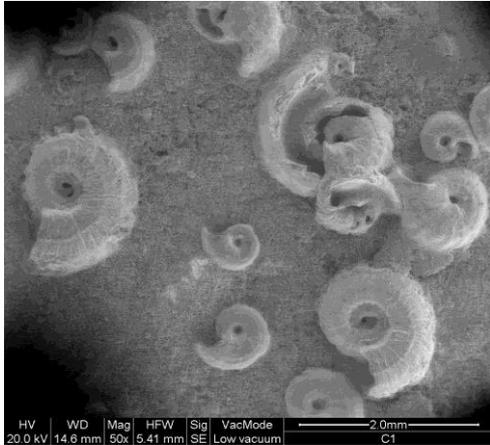


Fig. 1 - Gusci calcarei di serpulidi sul provino C1



Fig. 2 - Spicole e diatomee sul provino C2

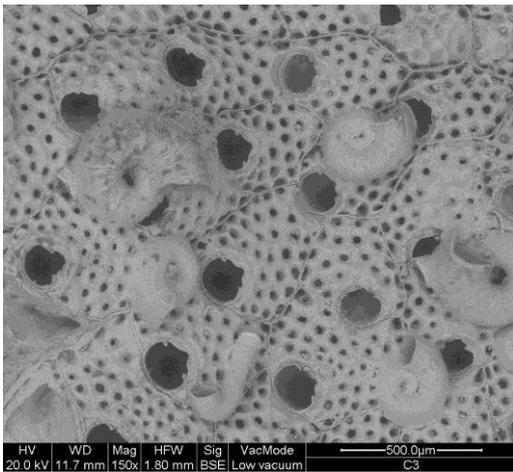


Fig. 3 - Gusci di serpulidi su briozoi, sul provino C3



Fig. 4 - Gusci calcarei di serpulidi sul provino C5



Fig. 5 - Presenza di balani colonizzati da briozoi presenti sul provino C6

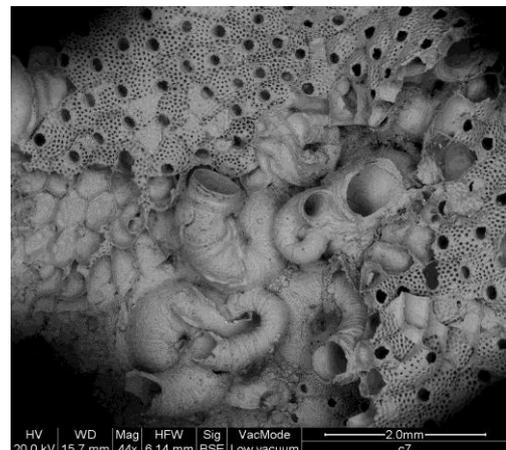
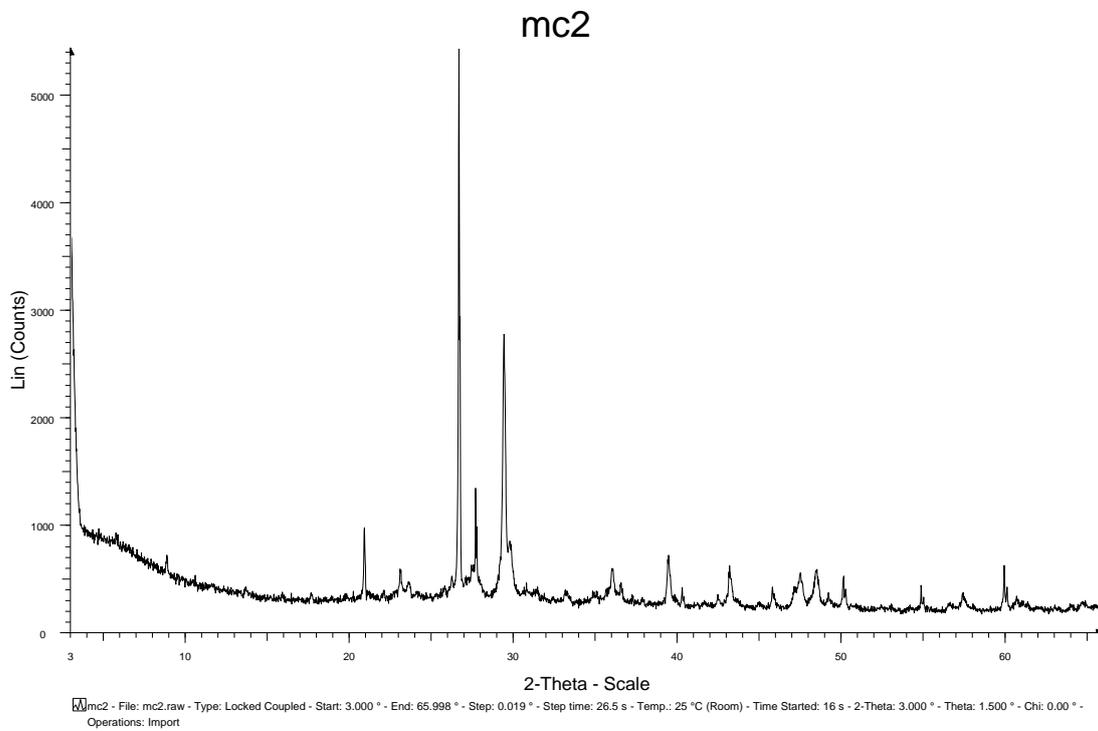
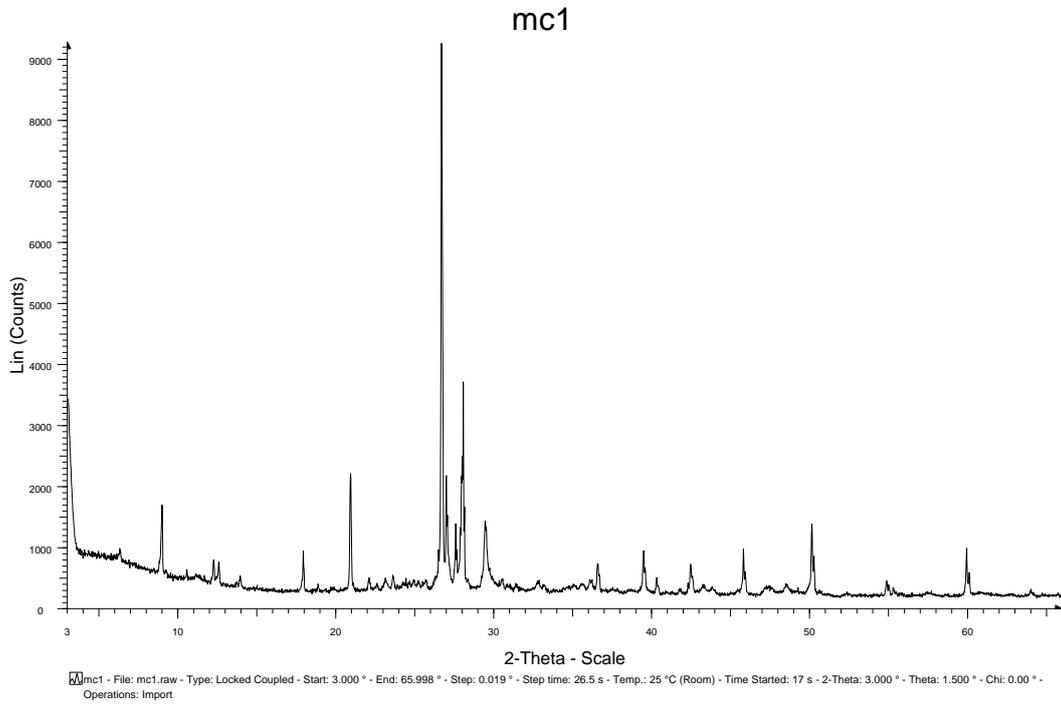


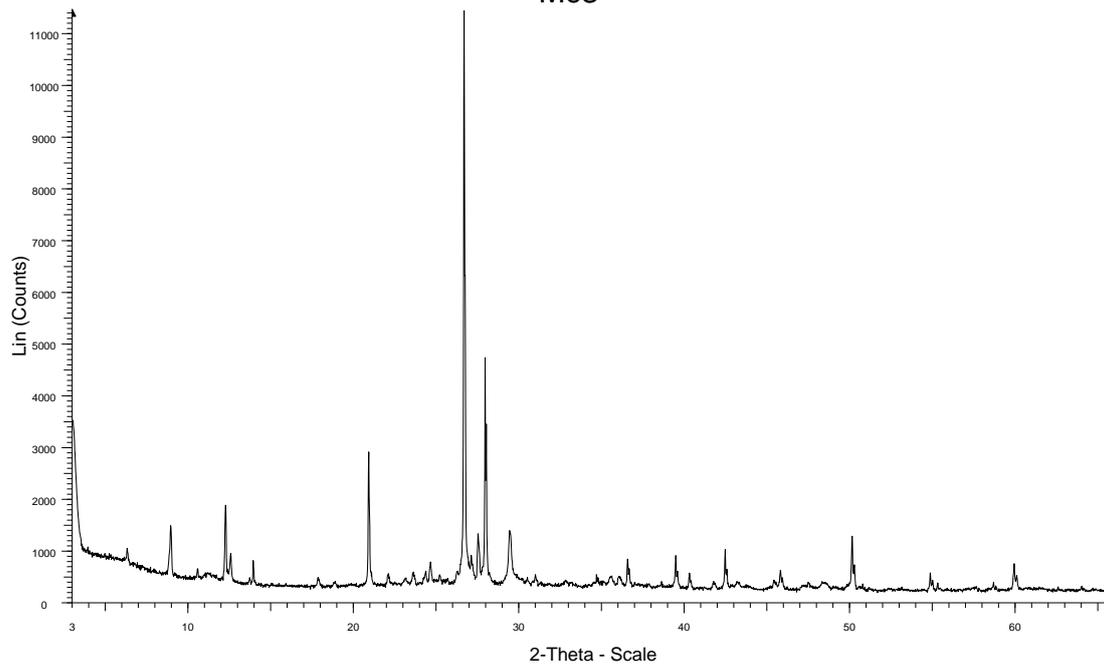
Fig. 6 - Gusci di serpulidi e briozoi presenti sul provino C7

ALLEGATO P

DIFFRATTOGRAMMI SU ALCUNI PROVINI IMMERSI 12 MESI A BAIJA

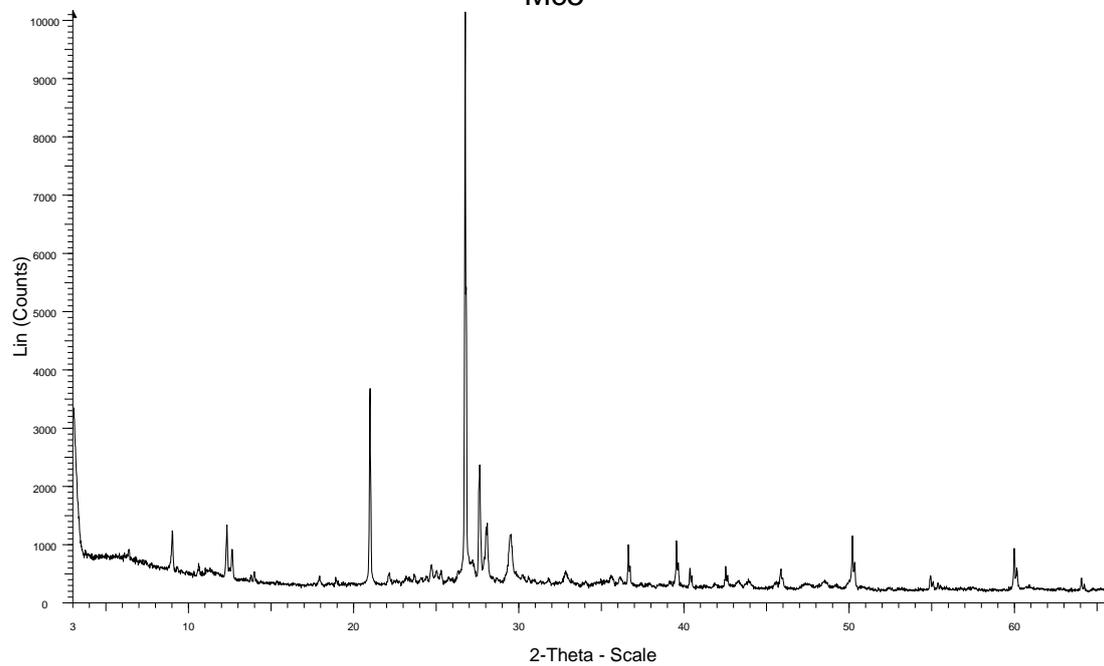


Mc3



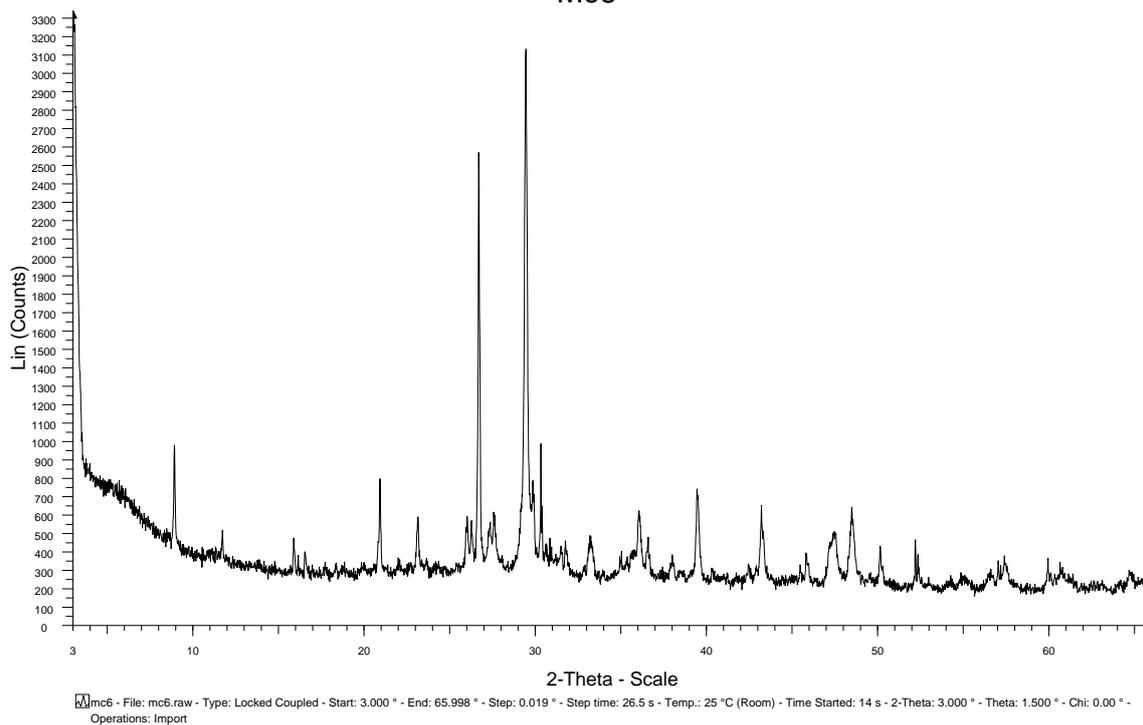
mc3 - File: mc3.raw - Type: Locked Coupled - Start: 3.000 ° - End: 65.998 ° - Step: 0.019 ° - Step time: 26.5 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 14 s - 2-Theta: 3.000 ° - Theta: 1.500 ° - Chi: 0.00 ° - Operations: Import

Mc5

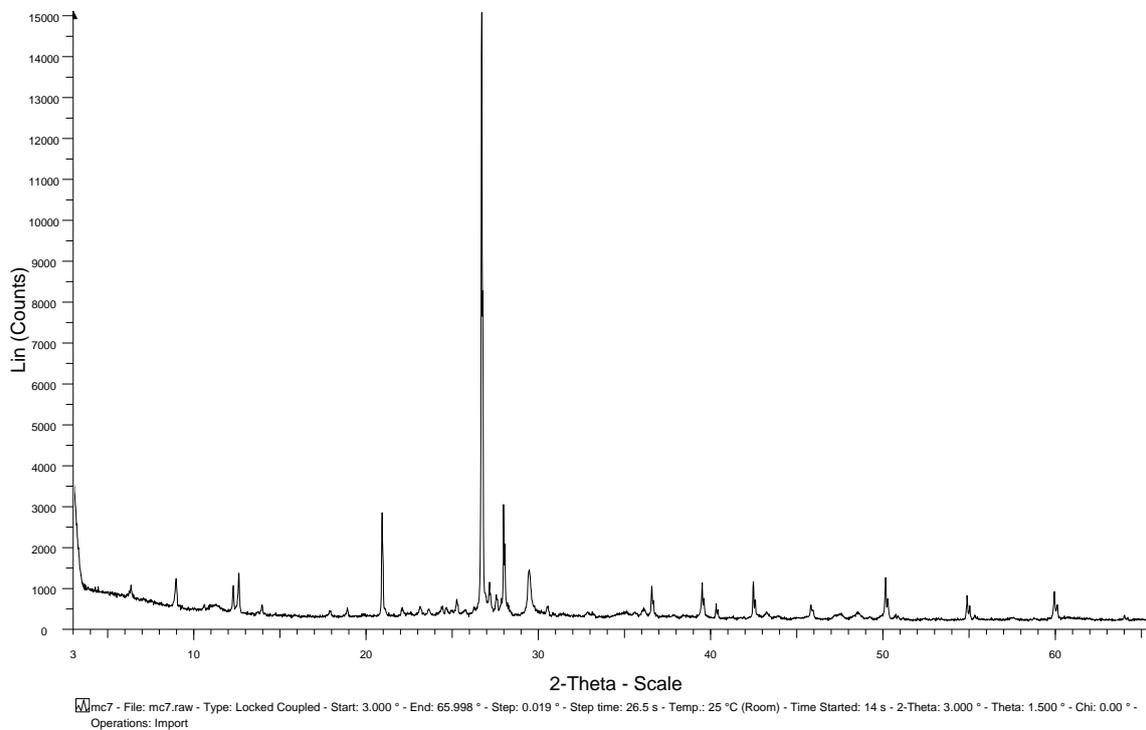


mc5 - File: mc5.raw - Type: Locked Coupled - Start: 3.000 ° - End: 65.998 ° - Step: 0.019 ° - Step time: 26.5 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 15 s - 2-Theta: 3.000 ° - Theta: 1.500 ° - Chi: 0.00 ° - Operations: Import

Mc6



Mc7



BIBLIOGRAFIA

Accademia Nazionale dei Lincei (1985) *Giornata di studio sul tema: Archeometria, Scienze esatte per lo studio dei Beni Culturali*, Roma, Liceo Interdisciplinare di Scienze Matematiche e loro Applicazioni

Albertano P. (2006), Biotecnologie per la diagnosi e il controllo del danno prodotto da biofilms epilitici, in *Biologia e Archeobiologia nei beni culturali: conoscenza, problematiche e casi di studio*, C. Sabbioni F. et al., Como, AIAR e Musei Civici- Comune di Como, pp. 112-124

Allotta G. (2001), *Valorizzazione del Patrimonio Culturale Sottomarino*, Agrigento, Edizioni Studiimedia

Amoroso G. (1995), *Il restauro della pietra nell'architettura monumentale*, Palermo, Dario Flaccovio Editore

Baer N.S. (1978), "Chemical Aspects of the Conservation of Archaeological Materials", *Archaeological Chemistry II*, Washington D.C., Edited by Giles F. Carter American Chemical Society, Advances in Chemistry, 171, pp.25-32

Barbieri M., Bavestrello G., Sarà M. (1995), "Morphological and ecological differences in two electrophoretically detected species of Cliona (Porifera, Demospongiae)", *Biol. J. Linn Soc.*, 54, pp. 193-200

Barone M., Dominici R., Muto F., Critelli S. (2008), "Detrital modes in a late miocene wedge-top basin, northeastern Calabria, Italy: compositional record of wedge-top partitioning", *Jour. Sed. Research*, 78, pp.693-711

Bernardo L., Vangale G., Manfredi L., Passalacqua N. (1995), Analisi preliminare dell'evoluzione del paesaggio sulla costa della Riserva Marina di Isola Capo Rizzuto, in *ambiente e turismo: un equilibrio multimodale*, Arcavacata di Rende, pp 241-254

Bernasconi M.P., Le Pera E., Critelli S., Randazzo G., Amore C. (2002), "Caratteri sedimentologici ed ecologici del delta del fiume Neto, Calabria orientale", *Studi Geologici Camerti*, ed. Edimond, pp.1-18

Biblioteca ICCROM. <<http://library.iccrom.org/>>

Calcinai B., Arillo A., Cerrano C., Bavestrello G. (2003), "Taxonomy-related differences in the excavating micro-patterns of boring sponges", *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, 83, pp. 37-39

Calcinai B., Bavestrello G., Cerrano C. (2004), "Bioerosion micro-patterns as diagnostic characteristics in boring sponge", *Boll. Mus. Ist. Biol. Univ.*, Genova, 68, pp. 229-238

Calcinai B., Bavestrello G., Cattaneo Vietti R., Cerrano C., Sarà M. (2001), Bioerosione e biocostruzione: il ruolo dei poriferi sul coralligeno del Mediterraneo, in *Biologia Marina Mediterranea Atti XXXI Congresso SIBM*, Sharm el Sheikh, 8, pp.181-190

Calcinai B., Bavestrello G., Cerrano C. (2005), "Excavating Sponge Species from the Indo- Pacific Ocean", *Zoological studies*, 1, 44, pp. 5-17

Calypto, Rivista Ufficiale dell'Area Marina Protetta Capo Rizzuto

- Caneva G., Nugari M.P., Salvadori O. (2003), *La biologia del restauro*, Firenze, Nardini editore
- Caneva G., Nugari M.P., Salvadori O. (2005), *La biologia vegetale per i Beni Culturali Vol.I Biodeterioramento e conservazione*, Firenze, Nardini Editore
- Caneva G., Nugari M.P., Ricci S., Salvadori O. (1992), Pitting of roman marble monuments and the related microflora, in *Symposium on Deterioration and Conservation of Stone*, VII Int, Lisbona, pp. 521-530
- Caneva G., Ricci S., Bellinzoni A.M., Di Stefano D. (2001), “L’annerimento dei muraglioni di Lungotevere: inquinamento chimico o colonizzazione biologica?”, *Biologi Italiani*, 3, pp. 43-47
- Catra M., Grimaldi S., Giaccone G. (2003), “La flora e la vegetazione della Riserva Naturale Marina Capo Rizzuto (Crotona): ricognizione preliminare”, *Boll. Accad. Gioenia Sc. Nat.*, Catania, 36, 363, pp.133-171
- Claude Albore Livadie (1991), Archaeology and Volcanology in the Phlegrean Fields, in *International Conference On Active Volcanoes and Risk Mitigation*, Napoli
- Cognetti G., Sarà M., Magazzù G. (1999), *Biologia marina.*, Bologna, Calderini
- Cormaci M., Furnari G., Giaccone G. (2003), “Macrofitobenthos”, *Biol.Mar.Medit*, suppl., 10, pp. 233-262
- Cornelio M., Manzoni A.(1999), “Caratterizzazione stagionale degli insediamenti di organismi macrobentonici su substrati sperimentali nel bacino centrale della Laguna di Venezia”, *Boll. Mus. Civ. St. Nat.*, Venezia, 49, pp.135-144
- Cornelio M., Occhipinti Ambrogi A. (2001), “Struttura e dinamica dei popolamenti macrofouling in relazione al periodo di insediamento nel Bacino Centrale della Laguna di Venezia”, *Boll. Mus. civ. St. Nat.*, Venezia, 52, pp.113-128
- C.R.I.BE.CU.M. (2006) (a cura del), *Atti del workshop (Siracusa, 28-29 ottobre 2005). L’approccio multidisciplinare allo studio e alla valorizzazione dei beni culturali.*, editrice Aracne
- Critelli S. (1999), “The interplay of lithospheric flexure and thrust accommodation in forming stratigraphic sequences in the Southern Apennines foreland basin system, Italy”, *Rendiconti di Scienze Fisiche e Naturali dell’Accademia Nazionale dei Lincei*, 10, 9, pp. 257-326
- Critelli S., Le Pera E. (1994), “Detrital modes and provenance of Miocene sandstones and Modern sand of the Southern Apennines thrust-top basins (Italy)”, *Jour. Sed. Research*, 64, pp.824-835
- Critelli S., Le Pera E. (1995), “Tectonic evolution of the Southern Apennines thrust-belt (Italy) as reflected in modal compositions of Cenozoic sandstone”, *Jour. Geology*, 103, pp. 95-105
- Davidde B. (2004), “Methods and strategies for the conservation and museum display in situ of underwater cultural heritage”, *Archaeologia Maritima Mediterranea*, 1, pp.137-150
- Davidde, B. (2002), “Underwater archaeological parks: a new perspective and a challenge for conservation”, *The Italian panorama IJNA*, 31, 1, pp. 83-88

- Del Monte M., Ferrari A. (1989) Patine di Biointerazione alla luce delle superficie marmoree. Le pellicole ad ossalati: origine e significato nella conservazione delle opere d'arte, in *convegno di Milano del 25-26 ottobre*, Milano, pp. 171-183
- Di Girolamo P., Ghiara M. R., Lirer L., Munno R., Rolandi G., Stanzione D. (1984), "Vulcanologia e petrologia dei Campi Flegrei", *Boll. Soc. Geol. It.*, 103, pp. 349-413.
- Di Nocera S., Ortolani F., Russo M., Torre M. (1974), "Successioni sedimentarie messiniane e limite Miocene-Pliocene nella Calabria settentrionale", *Boll. Soc. Geol. It.*, 93, pp. 575-607
- Fletcher R.L.(1988), "Brief Review of the Role of Marine Algae in Biodeterioration", *International Biodeterioration*, 24, pp.141-152
- Folk R.L. (1959), "Practical petrographic classification of limestone", *AM Assoc. Petroleum Geol Bull*, 43, pp. 1-3
- Giaccone G. (1997), "Il contributo alla conoscenza della biodiversità dell'attività scientifica subacquea", *Quad. Accad. Intern. di Sci. e Tecn. Subacquea*, Ustica, 19, pp. 19-29
- Giaccone G. (1993), The Vertical Zonation Along the Phytal System in the Mediterranean Sea and the Effects of Municipal and Industrial Waste-water Disposal on Phytobenthos Communities, in *Proceed 5th OPTIMA Meeting 8-15 September 1986*, Istanbul, pp. 47-56
- Giaccone G., Alongi G., Pizzuto F., Cossu A. (1994) , "La vegetazione marina bentonica sciafila del Mediterraneo: III Infralitorale e Circolitorale. Proposte di aggiornamento", *Boll. Accad. Gioenia Sci. Nat.*, Catania, 27, pp. 201-227
- Giaccone G., Alongi G., Battelli C., Catra M., Ghirardelli L. A., Pezzino A., Stefani S. (2003), "Guida alla determinazione delle alghe del Mediterraneo. Parte I: Alghe Azzurre (Cyanophyta o Cyanobacteriophyta)", Dipartimento di Botanica dell'Università di Catania
- Giaccone G., Alongi G., Cossu A., Di Geronimo R., Serio D. (1993), "La vegetazione marina bentonica del Mediterraneo: I Sopralitorale e Mesolitorale, Proposte di aggiornamento", *Boll. Accad. Gioenia Sci. Nat.*, Catania, 26, 341, pp.145-172
- Giaccone G., Di Martino V. (1999), "Biologia delle alghe e conservazione dei monumenti", *Boll. Acc. Gioenia Sci. Nat.*, Catania, 32, 356, pp. 53-81
- Giaccone G., Di Martino V. (1997), Inquadramento fitosociologico ed ecologia della vegetazione a Caulerpe in Mediterraneo, in *Atti del Convegno S.O.S. Caulerpa? Introduzione di nuove specie nel Mediterraneo e compatibilità con quelle presenti*, Cagliari, pp. 69-86
- Giaccone G., Di Martino V. (1997), "Vegetazione marina relitta in Mediterraneo", *Biol. Mar. Medit.*, 4, 1, pp. 388-392
- Giaccone G., Di Martino V. *Appunti di Biologia marina*
<http://www.dipbot.unict.it/appunti_alghe/elementi_corologia.htm>, 2000
- Ghirardelli E. (1981), *La vita nelle acque*, Torino, UTET

- Gianfrotta P. A., Pomey P. (1981), *Archeologia subacquea- storia, tecniche, scoperte e relitti*. Milano, Arnoldo Mondadori Editore
- Giolj F. Guidi. (1999), *Interventi di restauro. Analisi e costi delle indagini diagnostiche*, Roma, Dei Tipografia del Genio Civile.
- Green J.N., Pearson C.(1975), “A seventeenth century time machine: excavating the wreck of the Batavia”, *Australian Natural History*,18, 8, pp. 284-295
- Guillitte O. (1995), “Bioreceptivity: a new concept for building ecology studies”, *The Science of the total Environmet* ,167, pp. 215-220
- Hansen S.K., Rainey P. B., Haagensen J. A. J., Molin S. (2007), “Evolution of species interactions in a biofilm community”, *Nature*, Vol 445
- Hatch W. I. (1980), “The implication of carbonic anhydrase in the physiological mechanism of penetration of carbonate substrata by the marine burrowing sponge *Cliona celata* (demospongiae)”, *Biol. Bull.*, 159, pp. 135-147
- Ietto F., Critelli S., Federico M., “Lineamenti geomorfologici, sedimentologici e dinamica del tratto di costa compreso tra Crotona e Le Castella (Calabria ionica)”, *Giornale di geologia applicata*, 2008, Vol. 10, pp. 13-29
- Infantino E. (2001), *Atti del convegno: Alga maggiore e riccio femmina? Manuale didattico di ecologia applicata all'area marina protetta, Area Marina Protetta Capo Rizzuto*
- Larbi J.A. (2004), *Microscopy applied to the diagnosis of the deterioration of brick masonry*, *Construction and Building Materials*, 18:299-307
- Lazzarin V. (2006), *I musei di archeologia subacquea in Italia. Analisi della situazione e prospettive*. Tesi di Laurea in conservazione dei Beni Culturali, Università degli Studi Ca' Foscari di Venezia
- Lazzarini L., Tabasso M. L. (1986), *Il restauro della pietra*, Padova, Edizioni CEDAM
- Lena G. (2003), *Atti del Convegno “Problemi geoambientali nella costa fra Capo Colonna e Isola di Capo Rizzuto”*, Min. Amb. e Tutela del Territorio, Crotona
- Lorusso S. (2002), *La diagnostica per il controllo del Sistema: Manufatto-Ambiente. Alcune applicazioni nel settore dei beni culturali*, Bologna, Pitagora editrice
- Lorusso S., Schippa B. (2001), *Le metodologie scientifiche per lo studio dei beni culturali. Diagnosi e valutazione tecnico- economica*, Bologna, Pitagora editrice
- Marchetti R.(1993), *Ecologia applicata*, Milano, Città Studi
- Mattini M., Moles A. (2002), *Scienza e Restauro. Metodi di Indagine*. Firenze, Nardini editore
- Maniscalco F. (1992), *Archeologia subacquea. Manuale*, Napoli, Alfredo Guido editore
- Messina A., Russo S., Borghi A., Colonna V., Compagnoni R., Caggianelli A., Fornelli A. M., Piccareta G. (1994), “Il Massiccio della Sila Settore settentrionale dell'Arco Calabro-Peloritano”, *Boll. Soc. Geol. It.*, 113, pp. 539-586

Minopoli, Sara (2006), *Effetti dell'infiltrazione delle acque piovane sulla stabilità dei pendii, con particolare riguardo ai fenomeni d'instabilità che interessano le coltri piroclastiche nell'area urbana della città di Napoli*. Dottorato thesis, Università degli Studi di Napoli Federico II

Mizzan L., Moretti G. (1992), "Dati sull'insediamento e sull'accrescimento del macrofouling su pannelli metallici nel porto-canale di S. Nicolò (Laguna di Venezia)", *Boll. Mus. Civ. Nat., Venezia*, 41, pp. 55-89

Nicol W.L., Reisman H. M (1976), "Ecology of the Boring Sponge (*Cliona Celata*) at Gardiner's Island, New York", *Chesapeake Science*, 17, 1, pp. 1-7

Nobili A. (2004), *Progetto Scuola – Museo Archeosub: l'archeologia subacquea nelle scuole. Il mare come museo diffuso*. Regione Sicilia Assessorato dei Beni Culturali ed Ambientali e P.I.

Normal 20/85 (1996), Interventi Conservativi: Progettazione, Esecuzione e Valutazione Preventiva

Nugari M.P., A. M. Pietrini. (1997), "Trevi fountain: an evaluation of inhibition effect of water-repellents on Cyanobacteria and algae", *International Biodeterioration & Biodegradation*, 40, 2-4, pp. 247-253

Ogniben L. (1955), "Le argille scagliose del Crotonese", *Mem e Note Ist. Geol. Appl.*, Napoli, 6, pp. 1-72.

Olive, J., Pearson C. (1975), "The Conservation of Ceramics from Archaeological Sources", *Conservation in Archaeology and the Applied Arts*, Londra, IIC, pp. 63-68

Pearson, C. (1987), "Conservation of Ceramics, Glass and Stone", *Conservation of Marine Archaeological Objects*, Londra, Butterworths, pp. 253-267

Pennetta M., (1992), "Morfologia e sedimentazione della piattaforma continentale e scarpata ne tratto di costa compreso tra Punta Alice e Capo Rizzuto (Golfo di Taranto)", *Boll. Soc. Geol. It.*, 111, pp. 149-161.

Petriaggi R., (2004) "Restauro subacqueo delle strutture sommerse della peschiera romana di Torre Astura", *Lazio e Sabina*, 2, Roma, pp.273-276

Petriaggi R. (2005), "Nuove esperienze di restauro conservativo nel Parco Sommerso di Baia", *Archaeologia Maritima Mediterranea*, 2, pp.135-147

Petriaggi R., Davidde B. (2007), "Restaurare sott'acqua: cinque anni di sperimentazione del NIAS-ICR", *Bollettino dell'Istituto Centrale per il Restauro*, Roma, 14, pp. 127-141

Petriaggi R et Al., (2008), Verifica dell'efficacia delle malte idrauliche utilizzate per il restauro di strutture romane nel parco sommerso di Baia, in *Restaurare i restauri. Metodi, compatibilità, cantieri*, XXIV Convegno internazionale, Bressanone, 24 – 27 giugno, pp. 491-497

Petriaggi R., Davidde B. (2005), "The analytical Data Card of Underwater archaeological finds (SAMAS) for diagnosing the deterioration", *Archaeologia Maritima Mediterranea*, 2, pp. 161-170

- Petriaggi R., Mancinelli R. (2004), "An experimental conservation treatment on the mosaic floor and perimeter walls of room n. 1 of the so-called «Villa con ingresso a protiro» in the underwater archaeological park of Baia (Naples)", *Archaeologia Maritima Mediterranea*, 1, pp. 109-126
- Perry Christopher T. (1998), "Grain susceptibility to the effects of microboring: implications for the preservation of skeletal carbonates", *Sedimentology*, 45, pp. 39-51
- Peterson Model L. (1972), Materials from Post-Fifteenth-Century Sites in *Underwater Archaeology: A Nascent Discipline, Museum and Monuments*, UNESCO Parigi, 13, pp.243-256
- Pietrini A.M., Ricci S., Roccardi A. (2000), The temples of the archaeological area of Paestum (Italy): a case study on biodeterioration, In *9 th International Congress on deterioration and conservation of stone. Venice June 19-24*, Venezia, Vasco Fassina
- Raven P.H., Evert Ray F., Eichhorn S. E. (2002), *Biologia delle piante*, Bologna, Edizione Zanichelli
Relazione Nautilus sullo studio della biocenosi realizzato all'interno dell'AMP Capo Rizzuto.
- Relini G., Tixi F., Relini M., Torchia G. (1998), "Settlement on concrete blocks immersed in the Ligurian. Sea (N-W Mediterranean)", *Int. Biodeter. Biodegr.*, 41, pp. 57-65
- Relini G. (1988), "The state of the art in the protection of marine structures from biodeterioration", *Biodeterioration*, 7, pp. 292-304
- Ricci S. (2004), "La colonizzazione biologica di strutture archeologiche sommerse: i casi di Torre Astura e Baia", *Archaeologia Marittima Mediterranea*, 1, pp.127-136
- Ricci S., Bartolini M. (2005), *Il Biodeterioramento del Satiro*, Napoli, Electa
- Ricci S., Pietrini A.M. (1994), Caratterizzazione della microflora algale presente sulla Fontana dei Quattro Fiumi, Roma, in *III International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin. Venezia 22-25 giugno*
- Ricci S., Priori G. F. (2006) Aspetti del degrado biologico di pavimentazioni musive sommerse, in *Pavimentazioni storiche. Atti del Convegno di Bressanone*, pp. 655- 659
- Ricci S., Priori G.F., Bartolini M. (2007), "Il degrado biologico dei manufatti archeologici dell'Area Marina Protetta di Baia", *Bollettino dell'Istituto Centrale per il Restauro*, 14, pp. 116-126
- Riedel R. (1991) , *Fauna e Flora del Mediterraneo*, Padova, Franco Muzzio Editore
- Roda C. (1964), "Distribuzione e facies dei sedimenti neogenici nel Bacino Crotonese", *Geol. Romana*, pp. 319-366
- Rodriguez A. (1965), "Ricostruzione della linea di costa tirreniana nella zona Sud- Occidentale dei Campi Flegrei", *Boll. Soc. Naturalisti*, Napoli, 74, pp. 278-286
- Romeo M. (1967), "Stratigrafia micropaleontologica del Messiniano di Rossano", *Paleon. Italica*, 63, pp. 1-74
- Ronconi M. L. (1994), Turismo culturale ed informatica: un esempio di applicazione di un Sistema, in *Ambiente e Turismo: un Equilibrio Multimodale Università della Calabria*, Napoli, Grafitalia

- Ronconi M. L., Guerricchio A. (1994), Geoarcheologia e turismo nell'area crotonese (Calabria Ionica), in *Ambiente e Turismo: un Equilibrio Multimodale – Università della Calabria*, Napoli, Grafitalia, pp. 429-444
- Ronconi M. L., Guerricchio A. (1994), Un porto isola a Metaponto Lido: soluzione mediata fra domanda turistica ed esigenze di salvaguardia ambientale in *Ambiente e Turismo: un Equilibrio Multimodale – Università della Calabria*, Napoli, Grafitalia, pp. 452-458
- Ronconi M. L., Guerricchio A. (1994), Recupero di alcuni attraversamenti sul fiume Lao nel quadro di proposte turistico-ecologiche, in *Ambiente e Turismo: un Equilibrio Multimodale – Università della Calabria*, Napoli, Grafitalia, pp. 445-451
- Ronconi M. L., Guerricchio A. (1995) Osservazioni Geomorfologiche finalizzate alla ricerca archeologica dell'antico porto di Crotona (Calabria Jonica), in *Le scienze della Terra e l'Archeometria - Università di Bologna*, Rovereto, Patroni
- Rosell D., Uriz María-J. (2002), "Excavating and endolithic sponge species (Porifera) from the Mediterranean: species descriptions and identification key", *Org. Divers. Evol.*, 2, pp. 55–86
- Roveri M., Bernasconi A., Rossi M. E., Visentin C. (1992), Sedimentary evolution of the Luna Field Area, Calabria, southern Italy, *Accumulation and Production of the Europe's Hydrocarbons II. Spec. Publ. of the European ass. Of Petroleum Geoscientist*, Berlin, Springer-Verlag, 2, pp. 217-224
- Santantonio M., Teale C.T. (1987), "The Oligocene to recent foreland basin of the northern Apennines", *P.A. Allen, P. Homewood (eds.), Foreland Basins, Int. Ass. Sediment.*, 8, pp. 105-139
- Scandone R., Giacomelli L. (1991), Guidebook to the field excursion to Procida, Campi Flegrei and Vesuvius, in *International Conference On Active Volcanoes and Risk Mitigation*, Napoli
- Tantillo G. (2004), La manutenzione del calcestruzzo di cemento in ambienti marini: il caso dello stabilimento balneare di Mondello (Pa), in *Atti del Convegno Internazionale: "Architettura e materiali del Novecento", Bressanone 13-16 luglio 2004. Scienze e Beni Culturali XX*
- Tiano P., Pardini C. (2005), *Le Patine genesi, significato, conservazione*, Firenze, Nardini Editore
- Normal 3/80 (1988), Materiali Lapidei: Campionamento
- UNI 10922 (2001), Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Allestimento di sezioni sottili e sezioni lucide di materiali lapidei colonizzati da biodeteriogeni
- UNI 10923 (2001), Beni Culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Allestimento di preparati biologici per l'osservazione al microscopio ottico
- UNI 11182 (2006), Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Descrizione della forma di alterazione - Termini e definizioni
- Varie brochure e stampati dell'Area Marina Protetta Capo Rizzuto
- Vazquez-Calvo C. M., De Buergo A., Fort R., Varas M.J. (2007), "Characterization of patinas by means of microscopic techniques", *Materials Characterization*, 58, pp. 1119–1132
- Venturelli F., Virli L. (1999), *Invito alla Botanica*, Bologna, Zanichelli

Volpe G. (1998), Archeologia subacquea - Come opera l'archeologo sott'acqua. Storie dalle acque, in *VIII Ciclo di Lezioni sulla Ricerca applicata in Archeologia (Certosa di Pontignano 1996)*, Firenze, Edizioni All'Insegna del Giglio

Weaver J.C., Pietrasanta L. I., Hedin N., Chmelka B.F., Hansma P.K., Morse D. E. (2003), “Nanostructural features of demosponge biosilica”, *Journal of Structural Biology*, 144, pp. 271–281

Zecchin M., Massari F., Mellere D., Prosser G. (2004), “Anatomy and evolution of a Mediterranean-type fault bounded basin: the Lower Pliocene of the Northern Crotone Basin (Southern Italy)”, *Basin Research*, 16, pp. 117-143

Zecchin M., Massari F., Mellere D., Prosser G. (2003), “Architectural styles of prograding wedges in a tectonically active setting, Crotone Basin, Southern Italy”, *J. Geol. Soc.*, 160, pp. 863-880

Zuffa G.G., De Rosa R. (1978), “Petrologia delle successioni torbiditiche Eoceniche della Sila nord-orientale (Calabria)”, *Mem. Soc. Geol. It.*, 18, pp. 31-55

SOMMARIO

PREMESSA	5
CAPITOLO I.....	7
IL DEGRADO DEI MATERIALI LAPIDEI IN AMBIENTE MARINI.....	7
1.1 Introduzione	7
1.2 Il biodeterioramento dei manufatti sommersi.....	7
1.3 Biofouling e biofilm marino.....	11
1.4 Manufatti lapidei sommersi e biodeteriogeni	13
CAPITOLO II.....	17
INQUADRAMENTO GEOLOGICO E ARCHEOLOGICO DELL'AREA DI CROTONE E BAIA	17
2.1 Bacino crotonese.....	17
2.2 Geologia dell'area di Capo Colonna.....	19
2.3 Geoarcheologia dell'area crotonese.....	20
2.4 Geologia dei Campi Flegrei.....	22
2.5 Geoarcheologia di Baia	24
CAPITOLO III.....	27
DIAGNOSTICA DEI MATERIALI	27
3.1 Introduzione	27
3.2 Metodologie analitiche.....	27
3.2.1 Caratterizzazione e allestimento dei provini prima dell'immersione.....	27
3.2.2 Allestimento di preparati biologici per l'osservazione al microscopio ottico	28
3.3 Microscopia ottica	29
3.4 Stereomicroscopio.....	29
3.5 Schedature dei provini	30
3.6 Microscopio elettronico a scansione (S.E.M.).....	31
3.7 Analisi mineralogiche	31
CAPITOLO IV.....	33
INDAGINI DIAGNOSTICHE APPLICATE A REPERTI ARCHEOLOGICI IMMERSI IN AMBIENTE MARINO	33
4.1 Studio dei reperti archeologici di Crotona.....	33
4.1.1 Reperti archeologici analizzati	33
4.2 Osservazioni allo stereomicroscopio	34
4.3 Analisi petrografica dei reperti.....	35
4.3.1 Campione LB1	35
4.3.2 Campione LB2	36
4.3.3 Campione LB3	36
4.3.4 Campione LB4.....	36
4.3.5 Campione LB5	37
4.3.6 Campione LB6	37
4.3.7 Campione LA.....	38
4.3.8 Campione MA1.....	38
4.3.9 Campione MA2.....	39
4.3.10 Campione MA3.....	39
4.3.11 Campioni A1-A2-A3-A4.....	39
4.4 Analisi mineralogica di reperti	39
4.4.1 Analisi diffrattometriche del substrato	39
4.5 Osservazioni al microscopio elettronico a scansione (S.E.M.).....	40
4.6 Analisi del degrado dei reperti	41

4.6.1 Campione LB1	41
4.6.2 Campione LB2	42
4.6.3 Campione LB3	42
4.6.4 Campione LB4	42
4.6.5 Campione LB5	43
4.6.6 Campione LB6	43
4.6.7 Campione LA	44
4.6.8 Campione MA2	44
4.6.9 Campione MA3	45
4.6.10 Campione A1	45
4.6.11 Campione A2	46
4.6.12 Campione A3	46
4.6.13 Campione A4	47
4.7 Analisi mineralogica di reperti	47
4.7.1 Analisi diffrattometriche delle croste	47
4.8 Considerazioni conclusive	48
CAPITOLO V	51
INDAGINI DIAGNOSTICHE APPLICATE A PROVINI LAPIDEI IMMERSI IN AMBIENTE MARINO	51
5.1 Caso studio: Capo Colonna, Riserva Naturale Marina Protetta di Capo Rizzuto	51
5.1.1 Caratterizzazione e preparazione dei provini prima dell'immersione	51
5.2 Analisi petrografica dei campioni immersi nell'Area Marina di Crotona	52
5.2.1 Campione KG	52
5.2.2 Campione SL	52
5.2.3 Campione M	53
5.2.4 Campione C	53
5.2.5 Campione L	53
5.2.6 Campione SG	54
5.2.7 Campione GF	54
5.3 Osservazioni macroscopiche e analisi biologiche a fresco su provini immersi per 3 mesi	54
5.3.1 Provini della Serie 2	55
5.3.2 Provini della serie 5	56
5.4 Osservazioni allo stereomicroscopio dei provini immersi per un periodo di 3 mesi	57
5.5 Analisi del degrado	57
5.5.1 Campione L2	57
5.5.2 Campione GG2	58
5.5.3 Campione KF2	58
5.5.4 Campione SG5	59
5.5.5 Campione SL5	59
5.6 Rielaborazione dati	60
5.7 Osservazioni al microscopio elettronico a scansione (S.E.M.) dei provini immersi per un periodo di 3 mesi	60
5.7.1 Provini della serie 2	60
5.7.2 Provini della serie 5	61
5.8 Osservazioni macroscopiche e analisi biologiche su campioni freschi dei provini dopo 12 mesi di immersione	61
5.8.1 Provini della serie 1	62
5.8.2 Provini della serie 6	62
5.9 Osservazioni allo stereomicroscopio dei provini recuperati dopo 1 anno	63
5.10 Analisi del degrado	64
5.10.1 Campione L6	64
5.10.2 Campione SG6	65

5.10.3 Campione SL6.....	65
5.10.4 Campione GG1	66
5.10.5 Campione M6.....	66
5.10.6 Campione GF6	66
5.10.7 Campione GG6	67
5.10.8 Campione C6.....	67
5.10.9 Campione KF6.....	68
5.10.10 Campione KG1.....	68
5.10.11 Campione KG6.....	69
5.11 Osservazioni al S.E.M. dei provini immersi per un periodo di 1 anno	69
5.12 Elaborazione dei dati	70
5.13 Considerazioni conclusive.....	72
CAPITOLO VI.....	75
INDAGINI DIAGNOSTICHE APPLICATE A PROVINI LAPIDEI IMMERSI IN AMBIENTE MARINO.....	75
6.1 Caso studio: Parco Archeologico Sommerso di Baia (Napoli)	75
6.2 Analisi petrografica dei campioni immersi per un anno nell'Area Marina di Baia	76
6.2.1 Campione C1.....	76
6.2.2 Campione C2.....	77
6.2.3 Campione C3.....	77
6.2.4 Campione C5.....	77
6.2.5 Campione C6.....	78
6.2.6 Campione C7.....	78
6.3 Osservazioni allo stereomicroscopio	78
6.4 Risultati dell'osservazione allo stereomicroscopio della serie di provini immersi 1 anno	79
6.5 Risultati delle osservazioni al microscopio elettronico a scansione (S.E.M.)	80
6.5.1 Serie di provini 1 anno immersi scoperti (C1, C2, C3, C5, C6, C7)	80
6.6 Analisi del degrado.....	80
6.6.1 Campione C1.....	81
6.6.2 Campione C2.....	81
6.6.3 Campione C3.....	81
6.6.4 Campione C5.....	82
6.6.5 Campione C6.....	82
6.6.6 Campione C7.....	83
6.7 Considerazioni conclusive.....	83
CAPITOLO VII.....	85
CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	85
ALLEGATI.....	87
ALLEGATO A.....	89
ALLEGATO B.....	91
ALLEGATO C.....	93
ALLEGATO D	94
ALLEGATO E.....	95
ALLEGATO F	96
ALLEGATO G	98
ALLEGATO H	100
ALLEGATO I.....	102
ALLEGATO L.....	104
ALLEGATO M.....	106
ALLEGATO N	108
ALLEGATO O	109
ALLEGATO P.....	110

BIBLIOGRAFIA.....	113
SOMMARIO.....	121
RINGRAZIAMENTI.....	127

RINGRAZIAMENTI

A conclusione del mio lavoro di tesi è doveroso ringraziare il Prof. Gino Mirocle Crisci per la fiducia che ha sempre dimostrato nei miei confronti, per avermi dato la possibilità di svolgere questo tipo di lavoro che mi ha fatto crescere dal punto di vista scientifico.

Dal profondo del cuore un grazie e tanta riconoscenza al Dott. Mauro F. La Russa, che mi ha seguito ed aiutato a completare questo mio percorso di ricerca, incoraggiandomi nei momenti difficili.

Un grazie con stima e affetto alla Dott.ssa Sandra Ricci per il suo preziosissimo supporto sia dal lato scientifico che umano.

Desidero ringraziare il Prof. Roberto Petriaggi e la Dott.ssa Barbara Davidde per i loro puntuali consigli.

Un grazie ai dirigenti dell'Area Marina Protetta Capo Rizzuto per avermi dato la possibilità di venire in possesso del materiale da consultazione indispensabile per lo svolgimento del lavoro. In particolare, ringrazio Pierfrancesco Cappa dell'Area tecnico Scientifica.

Ringrazio la Prof.ssa Radiana Cozza per la sua disponibilità.

Un ringraziamento va al signor Ugo, il subacqueo che si è occupato delle immersioni fatte in mare e al mio collega Dott. Silvio Ruffolo, che mi ha accompagnato nelle sopracitate immersioni, grazie alla cui simpatia ho dimenticato quasi sempre la mia innata paura del mare.

Un grazie e tanto affetto alla Dott.ssa Mariuccia Sacco, per essermi stata vicina sempre e per essere riuscita a sopportarmi e a tirarmi su di morale nei momenti di sconforto, nel corso del mio tortuoso percorso di dottorato.

Ringrazio il Dott. Mariano Davoli per tutta la disponibilità e la pazienza che mi ha sempre dimostrato.

Desidero ringraziare il Dott. Giancarlo Niceforo e il Dott. Ugo Lanzafame per la loro disponibilità.

Ringrazio il Dott. Francesco Colonnese del laboratorio di sezioni sottili.

Infine, e non sicuramente per ordine di importanza, con tutto l'amore possibile desidero dire grazie a una persona che la vita in questi anni mi ha regalato e che è il mio punto di riferimento: mio marito Nunzio. Grazie per tutto quello che ha condiviso con me e per l'aiuto che mi ha dato, il suo amore è stato determinante per il mio morale e quindi per la riuscita di questo lavoro.

