

## 9. LE STROMATOLITI ATTUALI DI LAGOA VERMELHA

Il sito di Lagoa Vermelha (Rio de Janeiro, Brasile) (Fig. 9.1) è da tempo oggetto di ricerca a partire dai primi studi finalizzati alla comprensione delle modalità di precipitazione primaria della dolomite osservata all'interno dei *microbial mats* che originano le stromatoliti (Vasconcelos & McKenzie, 1997; cfr Capitolo 4) (Fig. 9.2).



Figura 9.1. Immagine da satellite illustrante la posizione geografica della laguna di Lagoa Vermelha presso Rio de Janeiro (Brasile), lungo la costa Atlantica (Vasconcelos *et al.*, 2006).

Dal punto di vista idrologico, le acque di Lagoa Vermelha hanno un carattere ipersalino che viene mantenuto pressoché costante grazie all'intensa evaporazione, durante la stagione secca, e grazie al continuo apporto di acque marine. L'aumento dell'alcalinità, grazie all'apporto di ioni  $\text{HS}^-$  e  $\text{HCO}_3^-$ , ed il contestuale arricchimento in ioni  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Ca}^{2+}$ , creano le condizioni favorevoli alla precipitazione di carbonati.

Un parametro geochimico determinante è l'alto potenziale riduttivo delle acque, dovuto alla presenza del *microbial mat* all'interfaccia acqua/sedimento. In tale strato vivono complesse comunità batteriche le quali, mediante la loro attività metabolica, favoriscono la precipitazione di Ca-dolomite. Van Lith *et al.*, (2003a) hanno, infatti, dimostrato l'azione determinante dei solfo-batteri nella precipitazione dei minerali Mg-carbonatici (Ca-dolomite e calcite alto-magnesiaca) nella stessa laguna ed in culture di laboratorio. Inoltre, Van Lith *et al.*, (2003b) hanno osservato che i minerali carbonatici precipitano e si accrescono direttamente sui filamenti batterici avvolti nell'EPS. Questa sostanza provvederebbe, infatti, a creare un microambiente favorevole alla precipitazione.



Figura 9.2. Stromatoliti a “cavolfiore” di Lagoa Vermelha ricoperte da un tappeto microbico. Acquario del Laboratorio di Geomicrobiologia, Istituto di Geologia, ETH-Zurigo.

Recentemente Vasconcelos *et al.*, (2006) hanno analizzato le comunità microbiche ed i processi di formazione dei minerali, che caratterizzano i *microbial mats* di Lagoa Vermelha (Fig. 9.3). Questi mostrano al loro interno un'alternanza di strati organici e strati minerali; quest'ultimi contengono cristalli di calcite e Mg-calcite (con  $Mg > 12\%$ ) avvolti da una matrice di EPS. I livelli organici, invece, sono costituiti da comunità microbiche stratificate e distinguibili dalla diversa colorazione.



Figura 9.3. Sezione trasversale del *microbial mat* di Lagoa Vermelha. Si notano gli strati interessati dalla precipitazione di minerali carbonatici (di colore bianco) alternati a strati organici non litificati formati da batteri fotosintetici (colore verde), solfo-batteri ossidanti (colore rosso) e solfo-batteri riducenti (colore grigio). La scala a destra è in cm (Vasconcelos *et al.*, 2006).

Sono presenti batteri fotosintetici negli strati superficiali (colore verde), solfo-batteri ossidanti più in basso (colore rosso) e, negli strati inferiori, solfo-batteri riducenti (colore grigio). Negli strati più superficiali del microbial mat, la fotosintesi e la respirazione aerobica operate dai batteri portano alla precipitazione della calcite, mentre nei sottostanti livelli del mat, l'ossidazione e la riduzione dei solfati, inducono la formazione di minerali carbonatici con graduale aumento della concentrazione di magnesio.

I cristalli di Ca-dolomite che si formano all'interno del *mat*, nel successivo seppellimento diagenetico possono subire un ulteriore arricchimento in Mg, fino a diventare dolomite stechiometrica (Vasconcelos & McKenzie, 1997).

### 9.1. FABRICS MINERALI ED ORGANICI

Le stromatoliti sulle quali sono state effettuate le osservazioni hanno una morfologia a cavolfiore, privata del caratteristico rivestimento esterno organico rappresentato dal *microbial mat* (Fig. 9.2 e Fig. 9.4). La struttura interna è caratterizzata da una laminazione a scala millimetrica tipicamente convessa verso l'alto (Fig. 9.5). In diversi punti la laminazione è discontinua o assente, probabilmente a causa dell'attività perforante di organismi endobionti; talora, il fabric non laminato corrisponde ad una tessitura trombolitica.

All'interno delle lamine è distinguibile materiale detritico intrappolato e gusci di organismi abitatori come ad es. bivalvi e gasteropodi. In tutto il campione sono, inoltre, presenti numerose cavità e microperforazioni (Fig. 9.5). Infine, la superficie esterna di queste piccole biocostruzioni può essere colonizzata, se esposta, da diversi organismi incrostanti come spugne, vermetidi e balani.

Sulla base della tessitura e dell'organizzazione della laminazione nelle stromatoliti sono state individuate tre facies, distinte come: laminata (L), a cavità (C) e porosa (P) (Figg. 9.6 e 9.7).

La facies L mostra una marcata laminazione messa in evidenza dall'allineamento di peloidi che si distribuiscono in bande più o meno dense. In questa facies è quasi assente il detrito alloctono.

La facies P appare piuttosto densa, compatta, ma affetta da microcavità che le conferiscono un aspetto poroso. Questa facies è distinta anche dalla presenza di macro peloidi che, in alcuni punti formano dei grumi, mentre in altri sono dispersi nella matrice.





Figura 9.4. Sezione di una stromatolite a cavolfiore (cfr Fig. 9.2), privata del rivestimento esterno rappresentato dal *microbial mat*, proveniente da Lagoa Vermelha.



Figura 9.5. Particolare della laminazione stromatolitica in cui si notano diverse cavità, molti grani intrappolati e, in basso a sinistra, il guscio di un bivalve.

La facies C è caratterizzata dalla presenza di grandi cavità che in alcuni casi seguono la laminazione, ma più spesso si presentano sparse nella struttura. Questi fori hanno dimensioni variabili fino a 5–6 millimetri. Al loro interno è possibile osservare detrito intra-bioclastico e cementi isopaci.

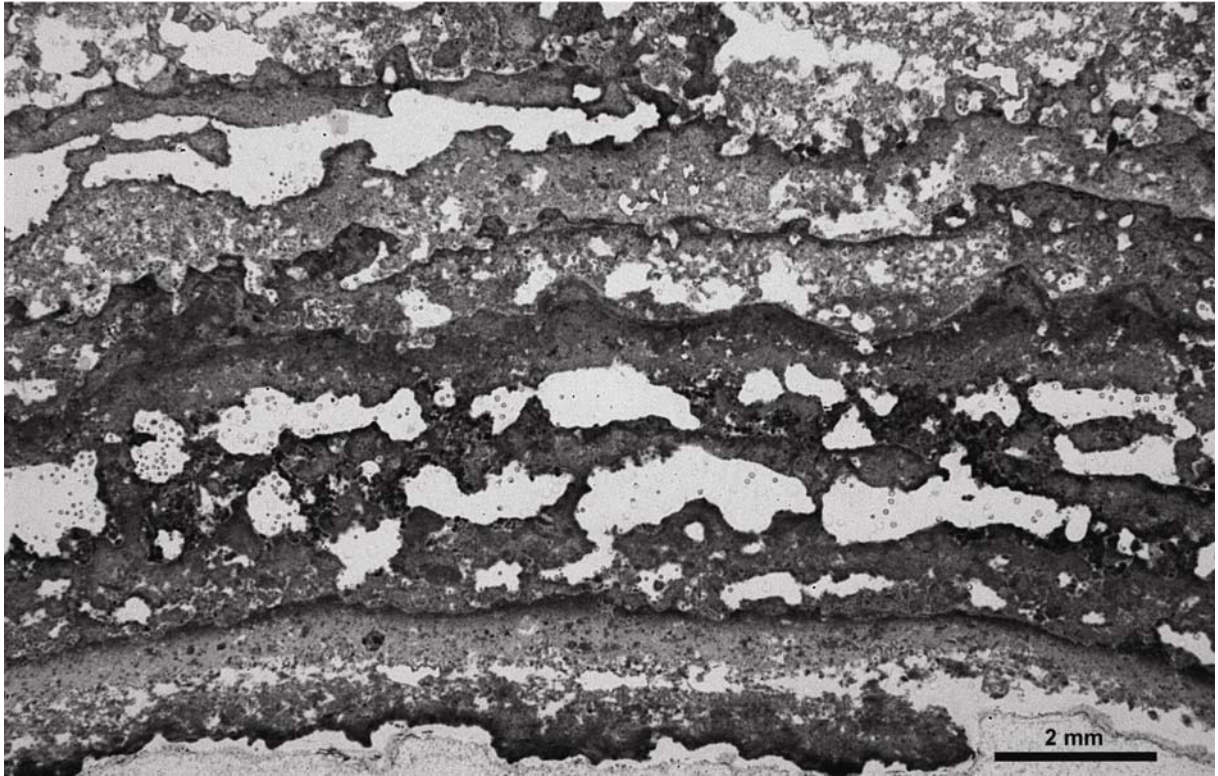


Figura 9.6. Sezione sottile di una porzione di lamine stromatolitiche irregolari, caratterizzate da numerose cavità allineate ed alternate a bande più dense a struttura peloidale.

Le indagini in microscopia ottica delle sezioni sottili hanno messo in evidenza, all'interno del fabric stromatolitico, un microfabric quasi interamente di tipo peloidale (Fig. 9.7). I peloidi hanno dimensioni di poche decine di microns e sono composti da micrite grigio scura o nerastra in cristalli non risolvibili; si presentano più o meno isolati o aggregati a formare un fabric clotted all'interno di una matrice microsparitica (Fig. 9.8). In fluorescenza UV i peloidi appaiono molto autofluorescenti, in contrasto alla “matrice” microsparitica che mostra autofluorescenza nettamente inferiore (Fig. 9.8B).



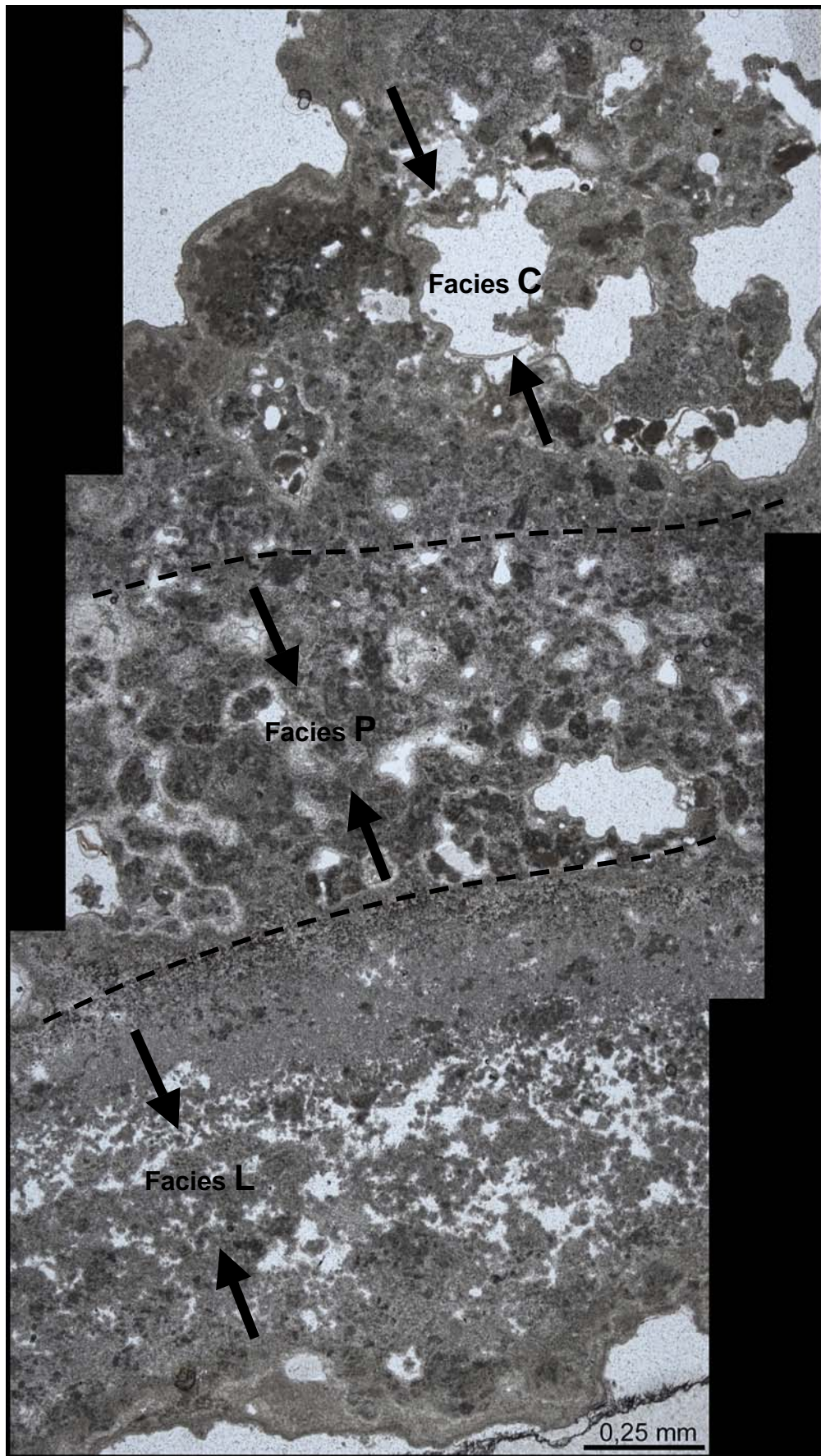


Figura 9.7. Microfacies in sezione sottile di lamine stromatolitiche. Le linee tratteggiate indicano l'andamento generale della laminazione e delimitano le diverse tessiture. Si noti la diffusa presenza di peloidi con diverse dimensioni.

Le cavità in sezione sottile si presentano con forme irregolari e generalmente bordate da cementi isopaci di modesto spessore, sono di solito vuote essendo prive di cementi spatici a mosaico secondari (Fig. 9.9). Nelle cavità l'analisi microscopica in luce trasmessa, ma soprattutto in autofluorescenza ha messo in evidenza la presenza di pellicole e filamenti organici tubiformi molto fluorescenti, quasi trasparenti in luce trasmessa (Figg. 9.10 e 9.8B).

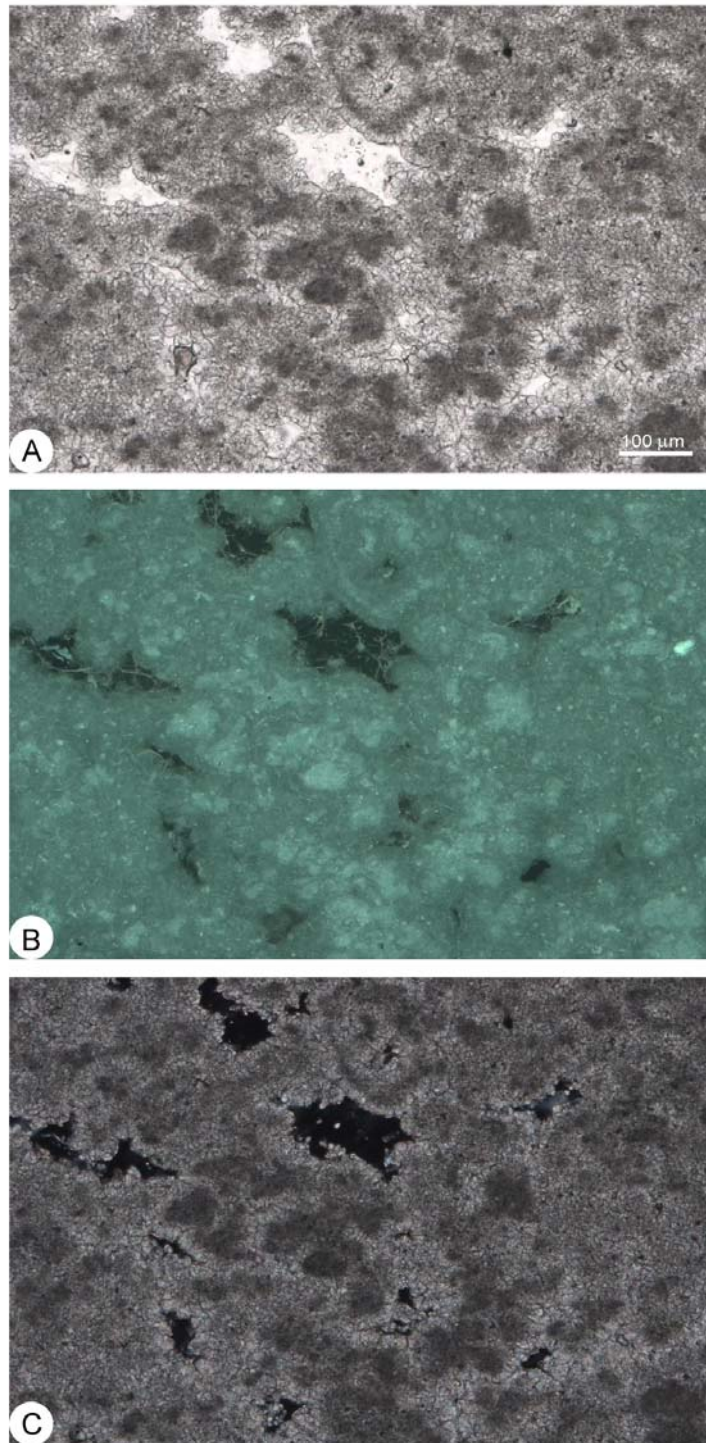


Figura 9.8. Microfabric a peloidi, rappresentati dai grumi scuri circondati da microsparite; visione dello stesso campo in luce trasmessa (A), in autofluorescenza (B) ed a luce polarizzata a Nicol incrociati (C).



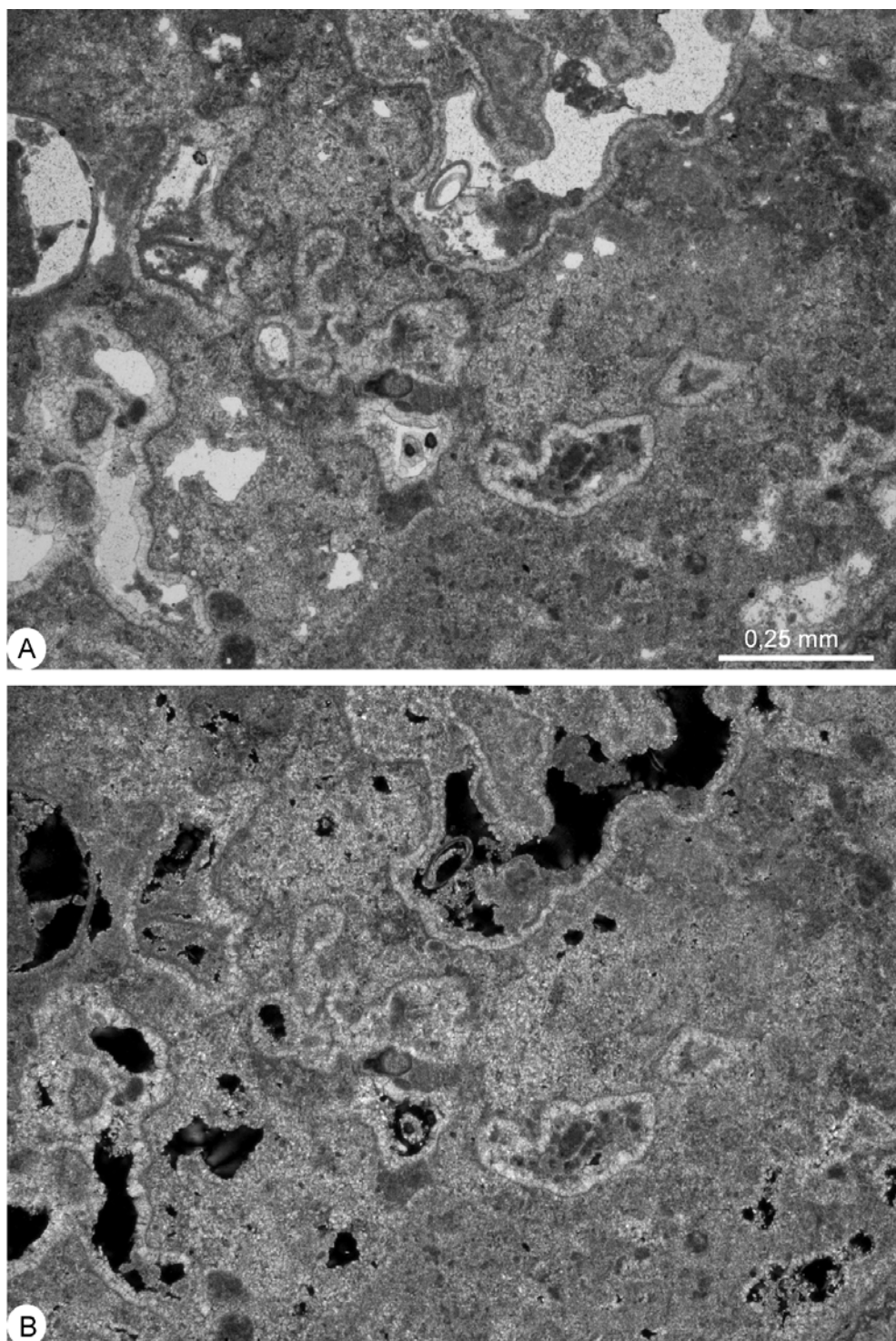


Figura 9.9. Cavità, perlopiù vuote o riempite di grani, bordate da cementi isopaci e prive di cementi secondari; veduta dello stesso campo in luce trasmessa (A) ed in luce polarizzata a Nicol incrociati (B).

Nel fabric stromatolitico sono inclusi grani alloctoni di varia granulometria, anche se generalmente fine, compresi bioclasti come foraminiferi, ostracodi e frammenti di gasteropodi e lamellibranchi (Fig. 9.11). I grani alloctoni sono generalmente scarsi e non significativi dal punto di vista volumetrico.



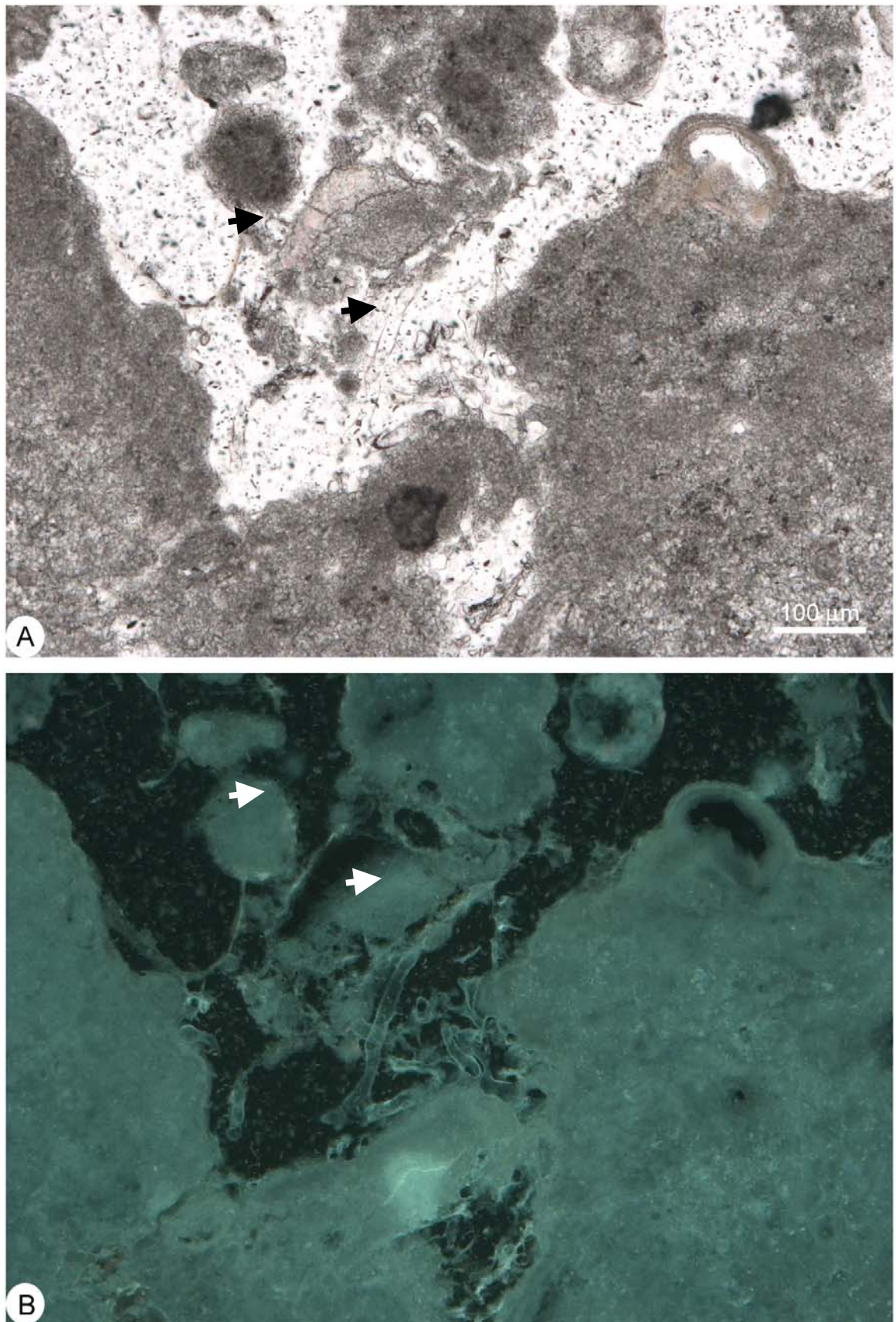


Figura 9.10. Pellicole e filamenti organici tubiformi (freccie) all'interno di una cavità delle stromatoliti; veduta dello stesso campo in luce trasmessa (A) e in autofluorescenza (B). Si veda anche la figura 9.8B.

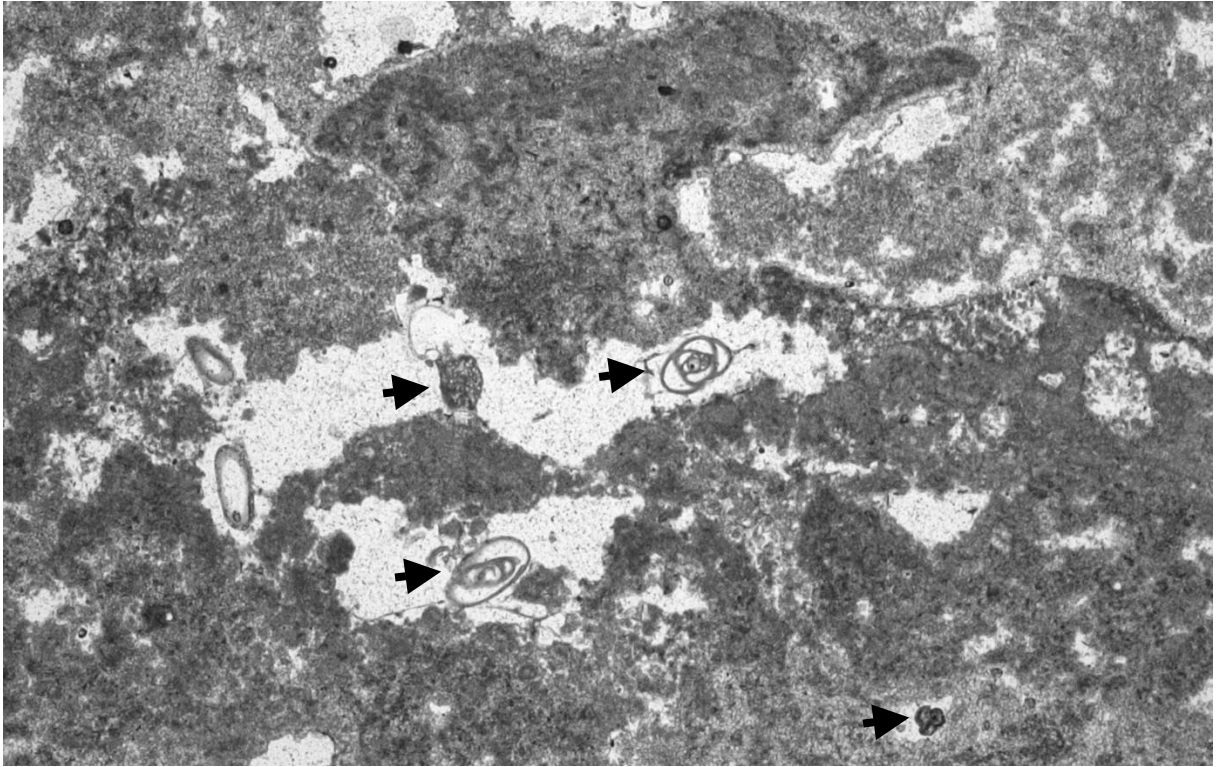


Figura 9.11. Grani alloctoni, perlopiù foraminiferi ed intraclasti (frecce), intrappolati nelle fenestrate della laminazione stromatolica.



## 9.2. ANALISI PETROGRAFICHE E GEOCHIMICHE

Le indagini micromorfologiche e composizionali sui componenti tessiturali delle stromatoliti hanno evidenziato due fasi minerali distinte. Queste si presentano con abito cristallino molto diverso: poliedri trigonali raggruppati a forma di ovoidi o clavi (Figg. 9.12A, B) e cristalli aciculari a raggiera in sferuliti o a ventaglio (Figg. 9.12C, D).

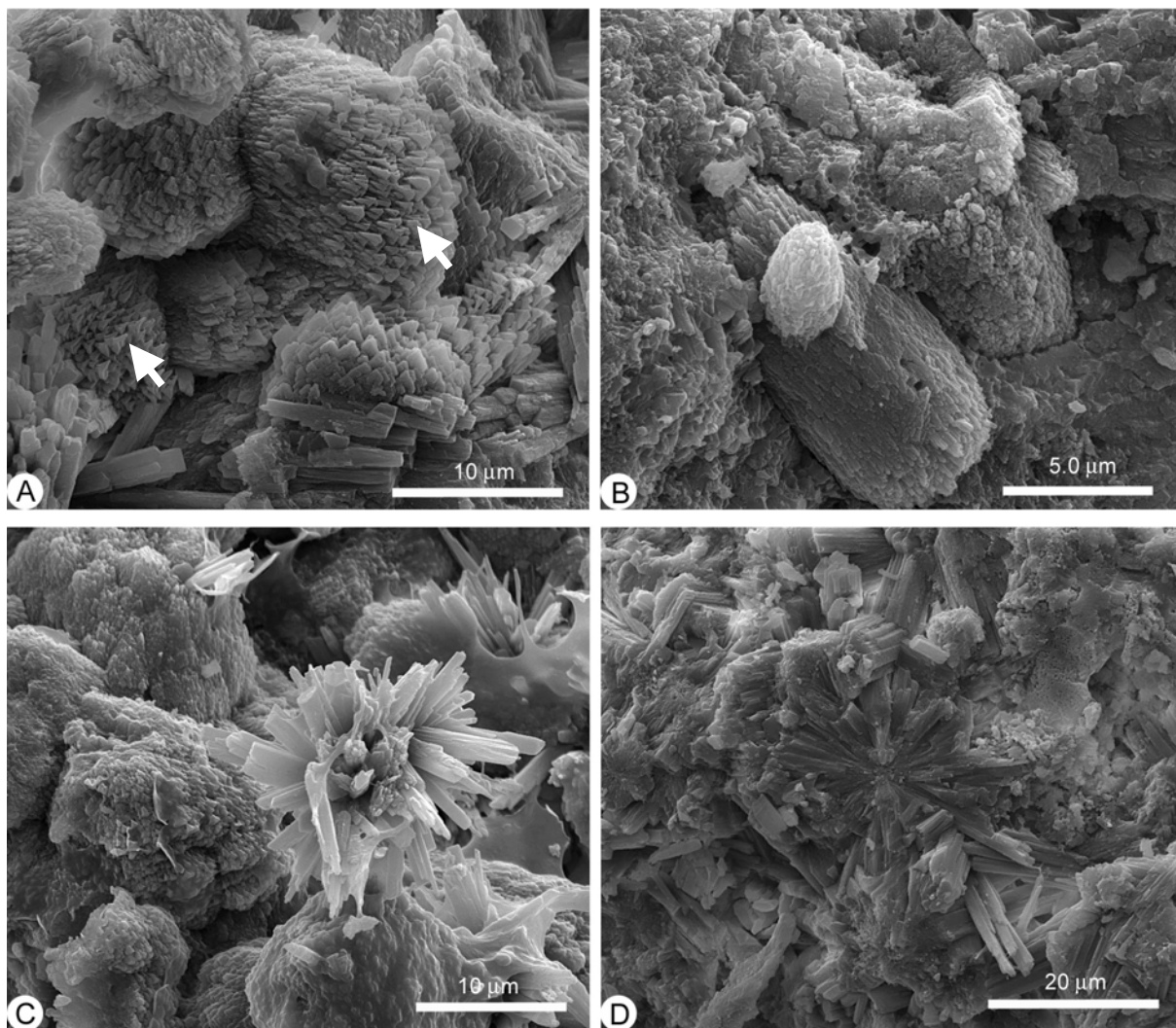


Figura 9.12. Cristalli con abito poliedrico trigonale (freccie) raggruppati a formare ovoidi (A) e (B); Cristalli con abito aciculare (centro delle due foto) in sferuliti, circondati da forme cristalline ovoidali (C) e (D).

Sono state effettuate analisi puntuali in EDS sui cristalli di carbonati delle due fasi già distinte su base morfologica. I poliedri delle forme ovoidali mostrano una composizione chimica con un contenuto di Ca pari al 70-75 mol% e di Mg 25-30 mol%. Sono presenti elementi minori come Na 1-2% e Sr < 0,6%. Tale composizione chimica, anche se ricavata in

maniera semi-quantitativa, indica che si tratta di cristalli di calcite con un elevato contenuto in magnesio. I valori di Mg osservati nella calcite di Lagoa Vermelha pongono tuttavia un problema terminologico, poiché con un contenuto di Mg superiore del 35% si ricade nel campo della "Ca-dolomite" (Vasconcelos & McKenzie, 1997), mentre, la composizione della "calcite alto-magnesiaca" dei cementi marini attuali in ambiente di piattaforma carbonatica tropicale e sub-equatoriale, non supera il 20% di Mg (Tucker & Wright, 1990).

Le forme cristalline aciculari, aggregate a formare sferuliti, hanno una composizione chimica con un contenuto di Ca >90 mol% e di Mg intorno al 2-3 mol%. Anche in questa fase minerale sono presenti elementi minori come Na 2-3 mol% e Sr 1-2 mol%. Questa composizione, unitamente con il caratteristico abito aciculare, suggerisce che si tratta di minerali di aragonite. In questo tipo di minerale il contenuto in Sr e Na rientra nei ranges conosciuti nei precipitati marini attuali in condizioni evaporitiche (Tucker & Wright, 1990).

Le due fasi cristalline si associano a formare una struttura costituita generalmente da aggregati di qualche decina di microns composti da forme ovoidali di calcite alto-magnesiaca circondate da fasce di cristalli di aragonite (Fig. 9.13).

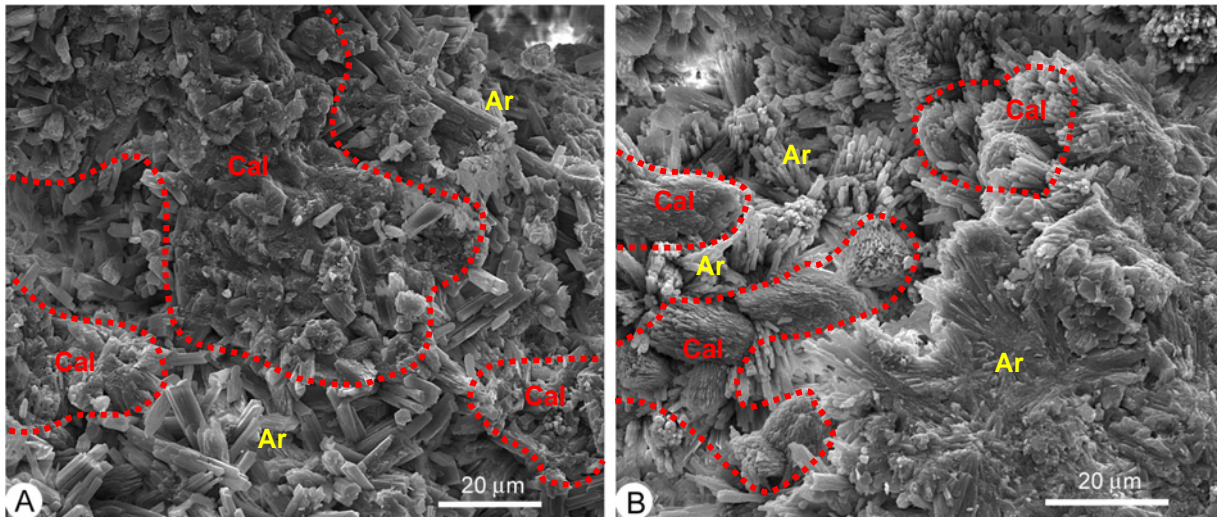


Figura 9.13. Le due fasi cristalline che compongono la struttura delle stromatoliti, si associano a formare aggregati di ovoidi di calcite alto-magnesiaca (Cal), circondati da fasce di cristalli aciculari di aragonite (Ar).



### 9.3. STRUTTURE ORGANICHE E MICROMORFOLOGIE BIOGENICHE

Attraverso le osservazioni al SEM è stata rilevata la presenza di strutture organiche amorfe di forma molto variabile. Queste strutture sono molto abbondanti nella microfacies C. In particolare appaiono come films di spessore 0,5-1  $\mu\text{m}$  che rivestono le cavità o che inglobano aggregati di cristalli (Fig. 9.14A). In alcuni casi è possibile riconoscere una struttura a rete sub-poligonale (Fig. 9.14B). Pellicole ancora più sottili e filamenti si osservano negli interstizi cristallini tra i poliedri di calcite alto-magnesiaca (Fig. 9.14C). Oltre alle forme planari, queste strutture si presentano come filamenti tubiformi di spessore micrometrico (Fig. 9.14D).

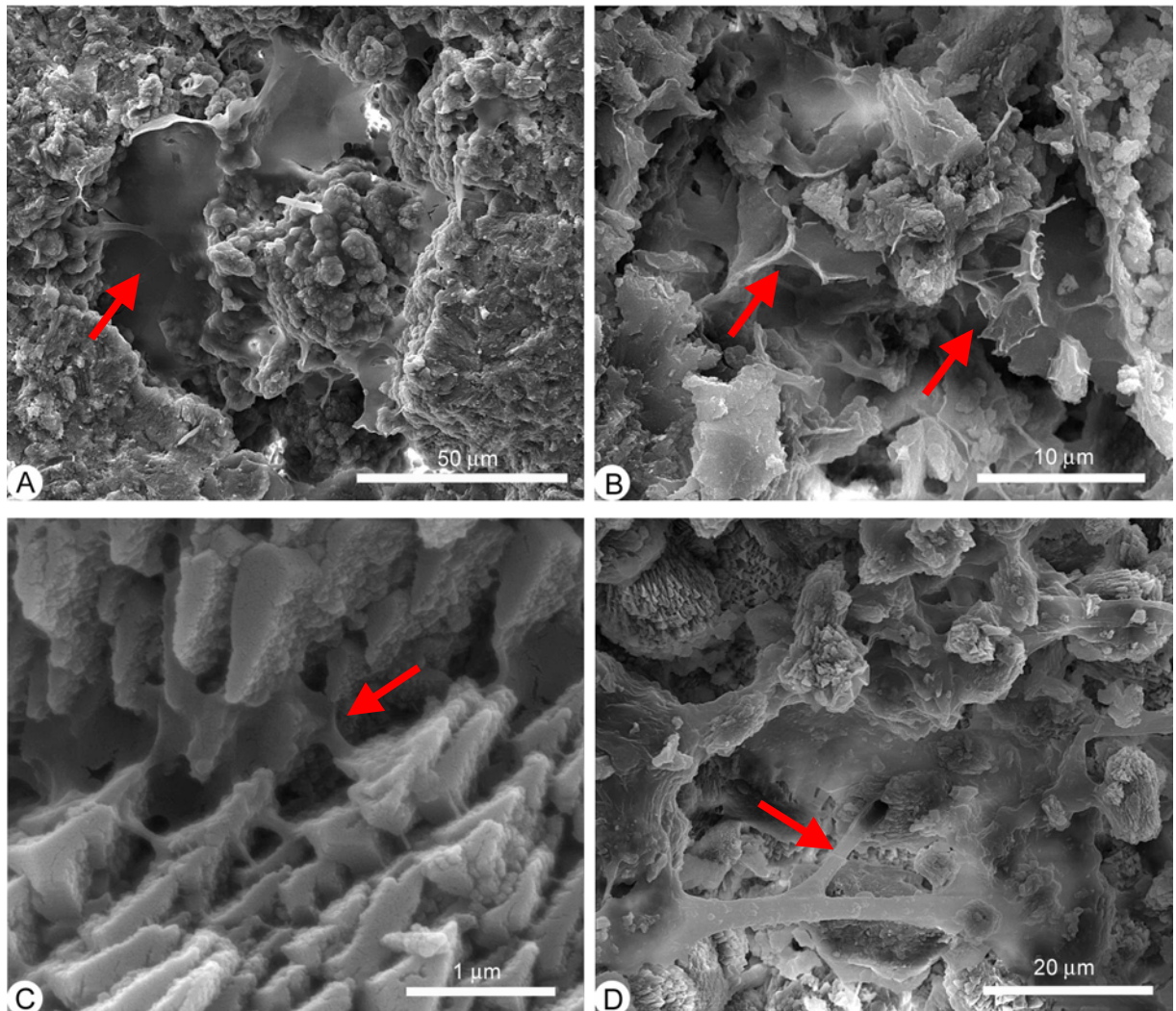


Figura 9.14. Pellicole organiche amorfe (freccie) che rivestono le cavità tra i cristalli (A), formano strutture sub-poligonali (B) e rivestono fittamente gli interstizi cristallini tra i poliedri di calcite alto-magnesiaca (C). D) Forme filamentose tubiformi.

Queste strutture coincidono in forma, posizione ed organizzazione con le pellicole ed i filamenti con elevata autofluorescenza osservati in microscopia ottica (Fig. 9.10). Questa caratteristica ne conferma la natura organica così come è suggerito anche dalle morfologie tridimensionali osservate al SEM e dai risultati delle analisi in EDS. Le analisi in microsonda, infatti, su questa sostanza restituiscono uno spettro di composizione molto vario, nel quale sono presenti elevatissimi picchi di C ed O rispetto alle analisi sui minerali di qualunque natura. Si ricava inoltre, in questi tessuti organici, oltre ai carbonati la presenza di elementi quali Cl, Na, K, P e S oltre a Si, Fe ed Al, che suggeriscono la presenza rispettivamente di sali di origine marina ed elementi terrigeni.

Nella struttura stromatolitica sono presenti molti resti fossili mineralizzati. Si tratta perlopiù di modelli interni ed esterni di forme filamentose e tubolari con diametri di circa 2  $\mu\text{m}$  (Fig. 9.15), oppure di forme sferiche/ovoidali a scala diversa, con diametri di 200-300 nm, 1,5-2,0  $\mu\text{m}$  e 3-4  $\mu\text{m}$  (Fig. 9.16). Le dimensioni e la forma di questi oggetti suggeriscono un'origine microbica, probabilmente batterica.

Le analisi puntuali in EDS indicano che questi resti fossili mineralizzati sono composti indifferentemente di calcite alto-magnesiaca o di aragonite in funzione dei minerali che li inglobano.

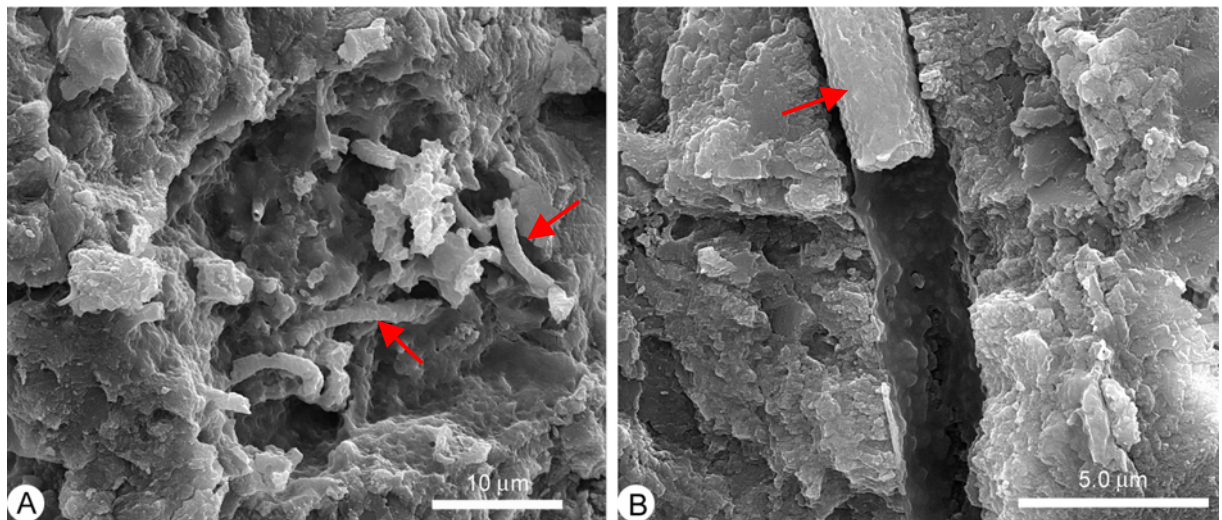


Figura 9.15. Resti fossili mineralizzati di filamenti di origine batterica (freccie). Si noti in (B) la sottile pellicola organica che riveste sia il filamento sia la parete della cavità.



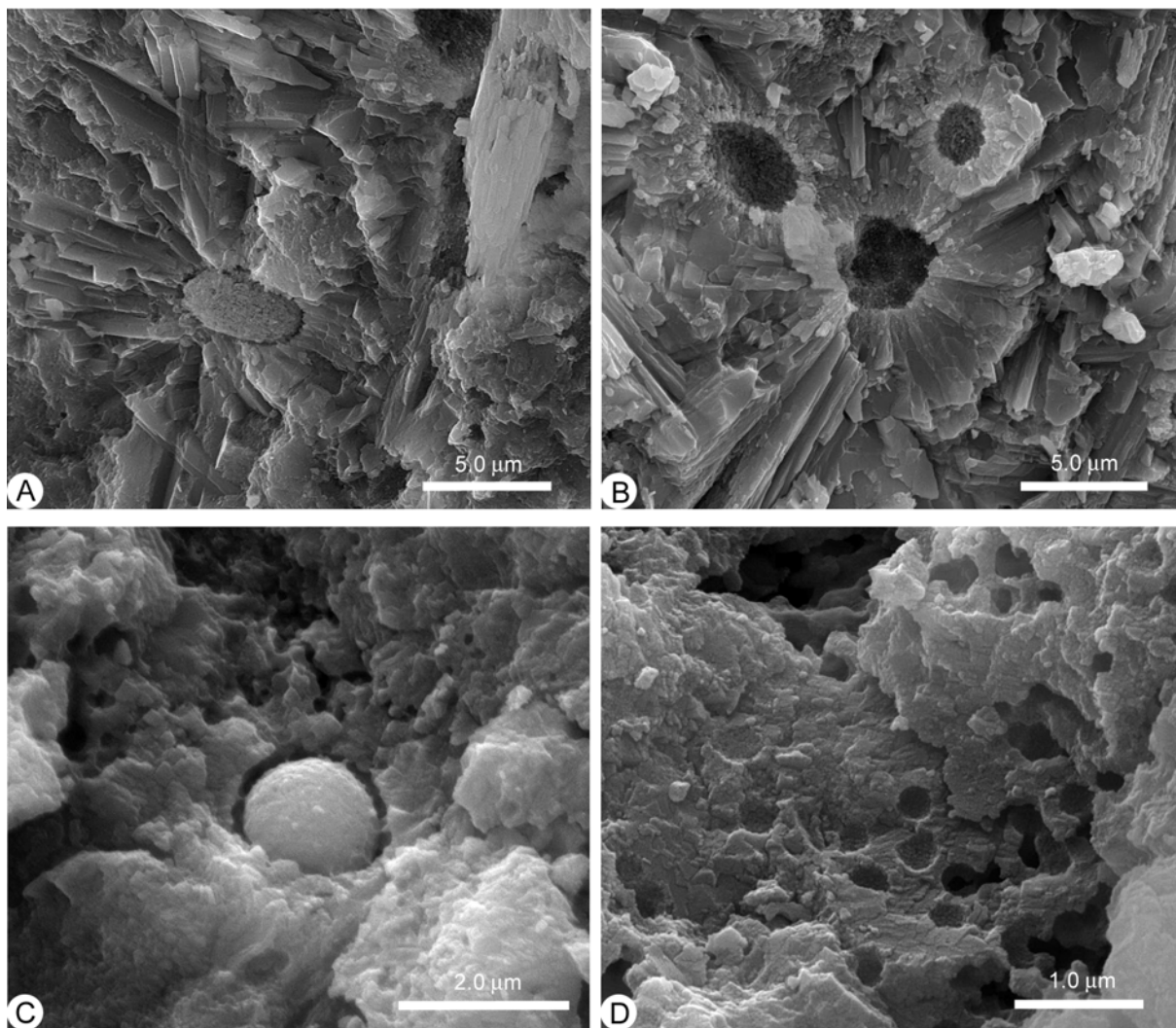


Figura 9.16. Resti fossili mineralizzati di forme batteriche: (A) ovoide mineralizzato, centro foto; (B) modelli esterni di forma ovoidale; (C) sfera mineralizzata; (D) calchi di sfere di dimensioni nanometriche.