

CAPITOLO 5

Hardgrounds

5.1.Introduzione:

Lungo le successioni deltizie, localmente, si osservano intercalazioni di livelli più o meno cementati, che, grazie all'effetto selettivo dell'erosione differenziale, sono ben evidenti sulle pareti esposte degli affioramenti.

Questi livelli sono spessi da qualche centimetro a circa mezzo metro e lateralmente estesi fino alla scala dell'affioramento.

Per quanto concerne la granulometria, essa riflette quella dei depositi nei quali essi sono intercalati ed in particolare, si tratta in genere di livelli siltosi e sabbiosi, raramente, ghiaioso-sabbiosi (figura 5.1).

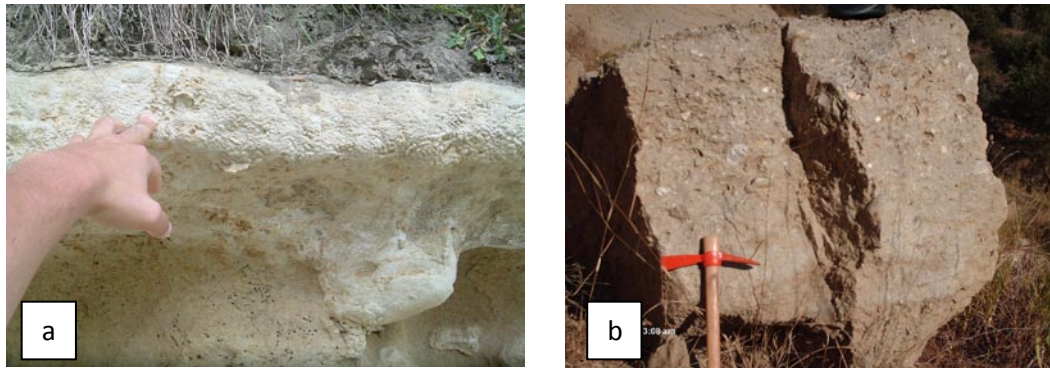


Figura 5.1: 1a) livello cementato siltitico; 1b) livello cementato sabbioso-ghiaioso-fossilifero.

In particolare, livelli spessi da qualche decimetro a mezzo metro e lateralmente estesi alla scala dell'affioramento marcano le superfici lungo le quali i rapporti verticali tra le associazioni di *facies* suggeriscono una rapida trasgressione; generalmente, sono sempre presenti al passaggio tra sabbie di fronte deltizia e depositi di prodelta,

mentre meno frequentemente lungo le successioni più prossimali (figura 5.2).

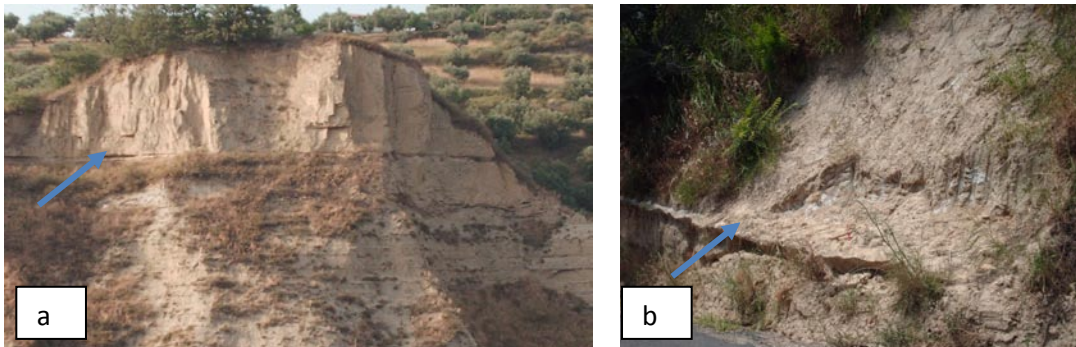


Figura 5.2: 2a) rapido passaggio verticale tra sabbie di fonte deltizia e depositi di prodelta; 2b) particolare della foto 2a, mostrandone il livello cementato siltitico che marca il passaggio tra le due associazioni di *facies*.

Oltre a marcare i passaggi verticali tra diverse associazioni di *facies*, i livelli cementati sono presenti anche nell'ambito di una singola associazione di *facies* e sono quasi sempre presenti nei depositi prodelta, mentre poco frequenti nelle porzioni più prossimali del sistema deltizio.

In particolare, nei depositi di prodelta, essi hanno spessori raramente superiori a 5-10 cm, a volte sono lateralmente discontinui ed in genere, associati lateralmente e verticalmente a piccole concrezioni, da centimetriche a decimetriche, di forma sferica o ellissoidale.

Essi sono abbondanti nella porzione mediana dell'associazione, dove caratterizzano intervalli spessi fino ad alcuni metri, nei quali si ripetono verticalmente con frequenza decimetrica o centimetrica; inoltre, sia i livelli che le concrezioni frequentemente si presentano più o meno ossidati, così come i sedimenti nei quali sono intercalati (figura 5.3).



Figura 5.3: Depositi di prodelta, caratterizzati da una fitta intercalazioni di sottili livelli cementati in associazione con abbondanti concrezioni.

La diffusa presenza di livelli cementati lungo le successioni studiate è confermata, oltre che dai numerosi affioramenti, anche da alcune caratteristiche morfologiche dell'area di studio; infatti, in corrispondenza di questi livelli sono riconoscibili superfici a basso gradiente ed in generale forme "litostrutturali" (figura 5.4).



Figura 5.4a: Superficie orizzontale corrispondente ad un banco di arenarie fossilifere.



Figura 5.4b: livello cementato soprastante sabbie fini bioturbate di fronte deltizia. Inoltre, queste forme litostrutturali, si localizzano a precise quote facilmente correlabili da versante a versante, come evidenziato nello stralcio di carta topografica di figura 5.5.

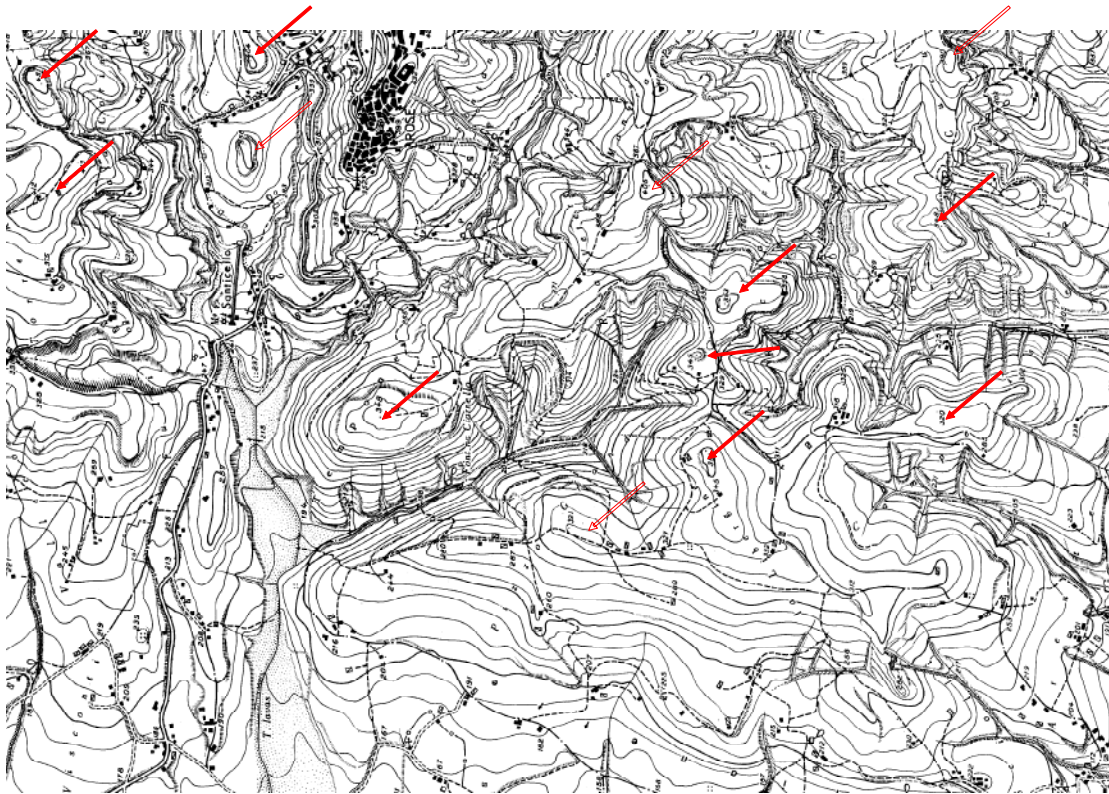


Figura 5.5: Stralcio di carta topografica (scala 1:10000), nella quale le frecce evidenziano la presenza di superfici a basso gradiente, originate dalla presenza di livelli cementati all'interno della successione.

ad un evento di tempesta; il campione PI corrisponde, invece, ad una delle abbondanti concrezioni cementate presenti nella porzione mediana dell'associazione siltitica di prodelta.

Infine, oltre le *facies* contenenti i livelli campionati, verso l'alto, i depositi di prodelta sono caratterizzati da un graduale *trend coarsening-shallowing upward*, fino a passare a depositi sabbioso-ghiaiosi.

5.3. Caratteri petrografici:

-Il campione FS consiste in una siltite con una modesta componente arenacea fine; in particolare, l'osservazione in sezione sottile ha messo in evidenza la presenza di una matrice carbonatica microcristallina (figura 5.7a).

I grani sono costituiti prevalentemente da quarzo e secondariamente da feldspati e miche; inoltre, i plagioclasti, raramente, sono ricoperti da calcite di sostituzione e le miche, localmente, sono isorientate parallelamente rispetto all'interfaccia deposizionale.

La matrice carbonatica, a luoghi, si presenta arrossata (figura 5.7b).

a



b

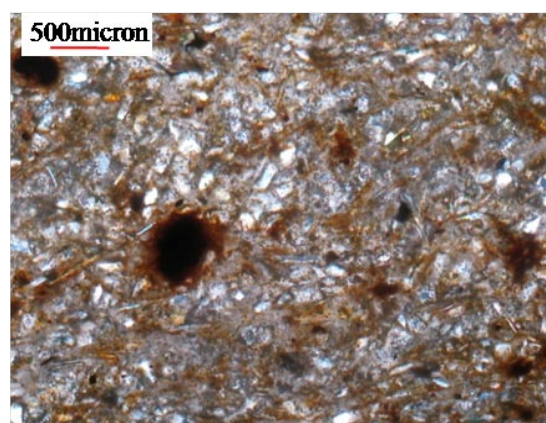
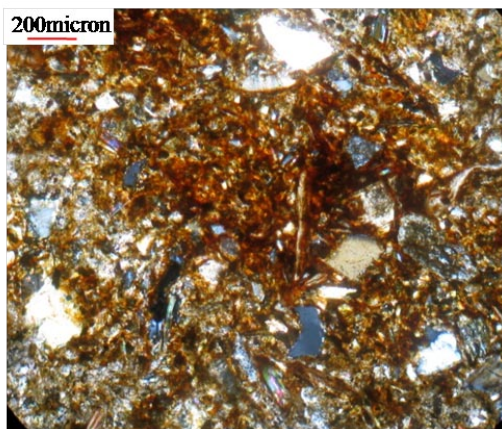


Figura 5.7: Immagini al microscopio ottico a nicols incrociati del campione FS. 7a) Vista a bassi ingrandimenti che evidenzia la tessitura della roccia. 7b) Dettaglio di un'area della sezione che evidenzia la matrice carbonatica localmente arrossata.

-Il campione IF è costituito da una arenaria fine, a matrice carbonatica microcristallina, che a luoghi si presenta molto arrossata e che rappresenta circa il 20-25% del volume della roccia (figura 5.8a).

I granuli consistono prevalentemente in quarzo e secondariamente in feldspati, miche, frammenti di rocce (tra i quali si riconoscono scisti e gneiss) e minerali densi (tra i quali tormalina); inoltre, la roccia è relativamente ricca di bioclasti, tra i quali si riconoscono principalmente gusci di foraminiferi bentonici ricristallizzati (figura 5.8b).

a



b

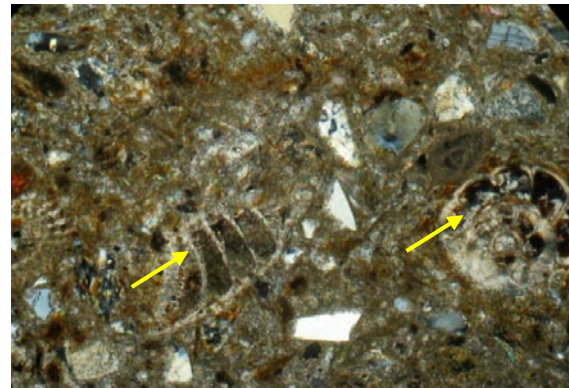


Figura 5.8: Immagini al microscopio ottico a nicols incrociati del campione IF. 8a) Vista a bassi ingrandimenti che evidenzia la tessitura della roccia e la matrice carbonatica particolarmente arrossata. 8b) Dettaglio di un'area della sezione dove sono presenti due frammenti di gusci di foraminiferi bentonici (freccie).

-Il campione PI è simile al campione FS, poiché consiste in una siltite con una modesta componente sabbiosa medio-fine; anche in questo caso la matrice è di natura carbonatica microcristallina, per la quale aumenta notevolmente il grado di arrossamento (figura 5.9a).

I grani sono costituiti prevalentemente da quarzo e secondariamente da feldspati e miche, con queste ultime, localmente, isorientate parallelamente all'interfaccia deposizionale.

I bioclasti, che consistono in gusci di foraminiferi bentonici ricristallizzati, sono piuttosto scarsi in questo livello.

Infine, a luoghi si riconoscono cementi a sviluppo isopaco composti di cristalli di calcite spatica a palizzata, che rivestono varie cavità a volte originate da fratture (figura 5.9b).

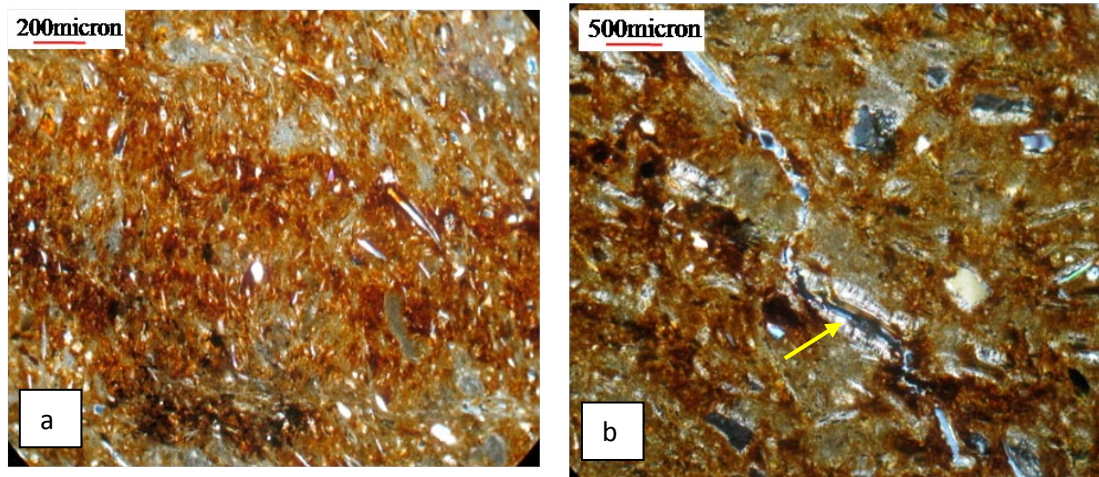


Figura 5.9: Immagini al microscopio ottico a nicols incrociati del campione PI. 9a) Vista di un'ampia porzione di roccia che evidenzia il diffuso arrossamento della matrice e l'isorientamento dei grani di mica. 9b) Area della sezione nella quale si osservano alcuni grani immersi nella matrice carbonatica in parte arrossata e una cavità orlata di cementi spatici a palizzata (freccia).

5.4. Analisi al microscopio elettronico a scansione (SEM):

Le analisi al SEM sono state finalizzate prevalentemente alla caratterizzazione della matrice carbonatica presente indifferentemente in tutti i livelli (figura 5.10).

In particolare, la matrice che appare non arrossata al microscopio ottico, è costituita da cristalli anedrali a volte subdedrali con dimensioni comprese tra 4 e 10 micron (figura 5.11); nella maggior parte dei casi la

matrice riempie le cavità presenti tra i grani senza una distribuzione preferenziale a mosaico.

Localmente, sono stati evidenziati sottili (poche decine di micron) orli isopaci di cristalli di matrice che bordano grani di varia natura (figura 5.12); questi cementi microcristallini isopaci precedono il riempimento del resto dello spazio intergranulare da parte della restante componente di matrice.

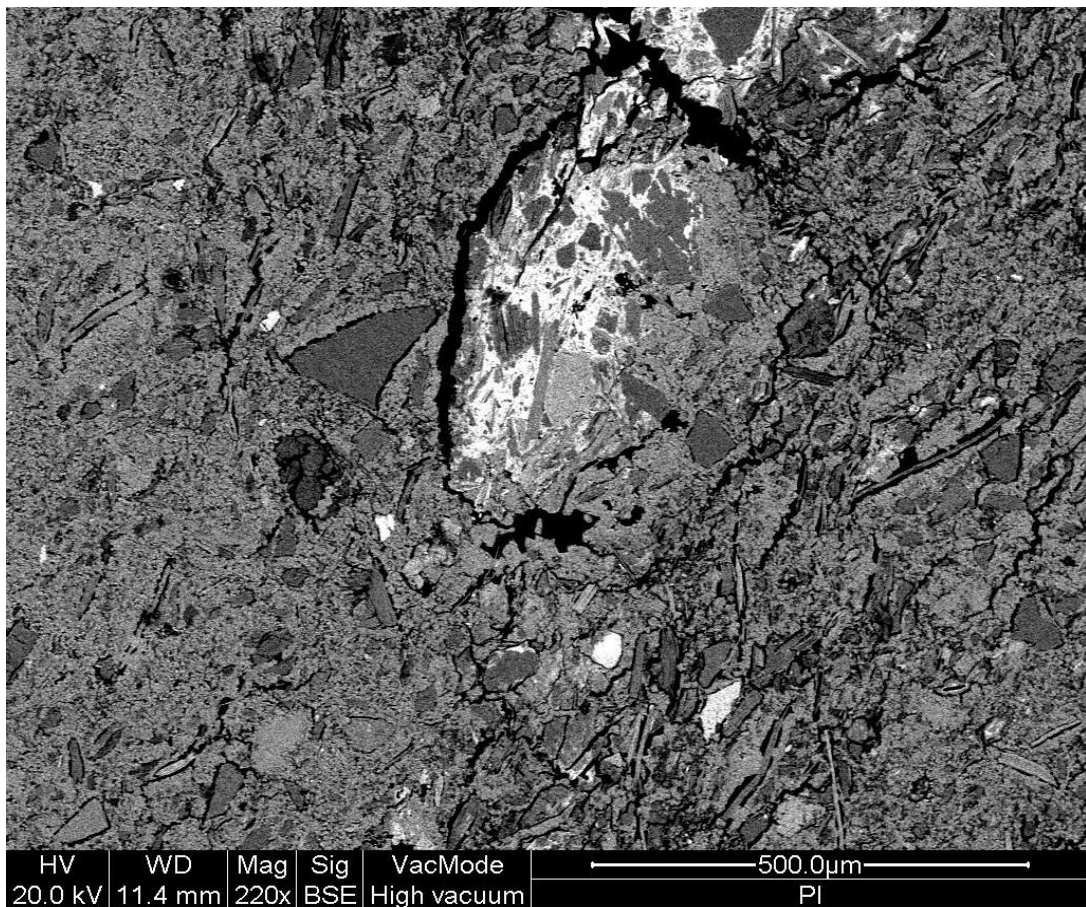


Figura 5.10: Immagine al SEM in BSE della superficie lucida di una sezione sottile che mostra i rapporti tra grani e matrice. In particolare la vista in BSE consente di differenziare due tipologie di matrice: di colore bianco (corrispondente alle porzioni arrossate ed opache al microscopio ottico) e di colore grigio uniforme (corrispondente alla matrice microcristallina più limpida).

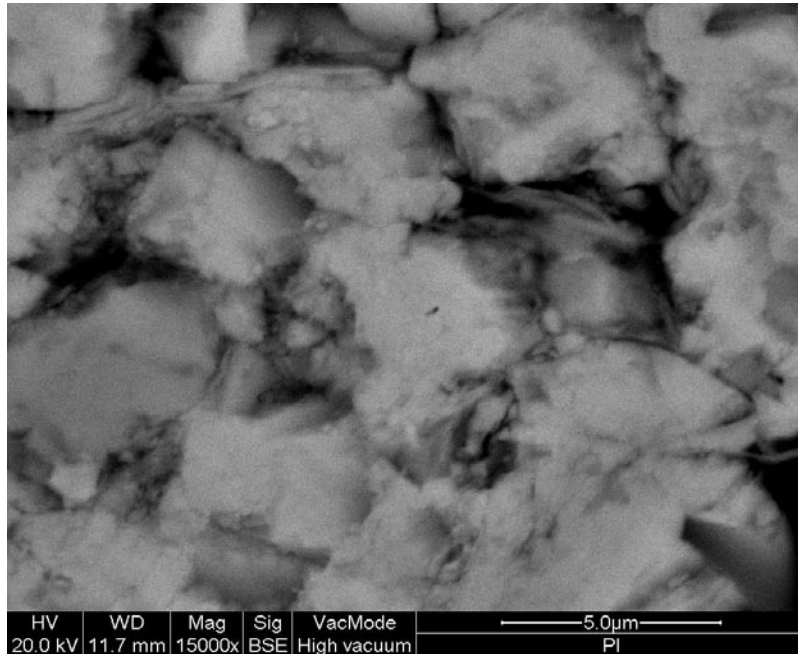


Figura 5.11: Vista ad alti ingrandimenti dei cristalli carbonatici costituenti la matrice carbonatica nelle porzioni non arrossate. Si notano alcuni minerali (probabilmente argillosi) con abito lamellare negli interspazi cristallini.

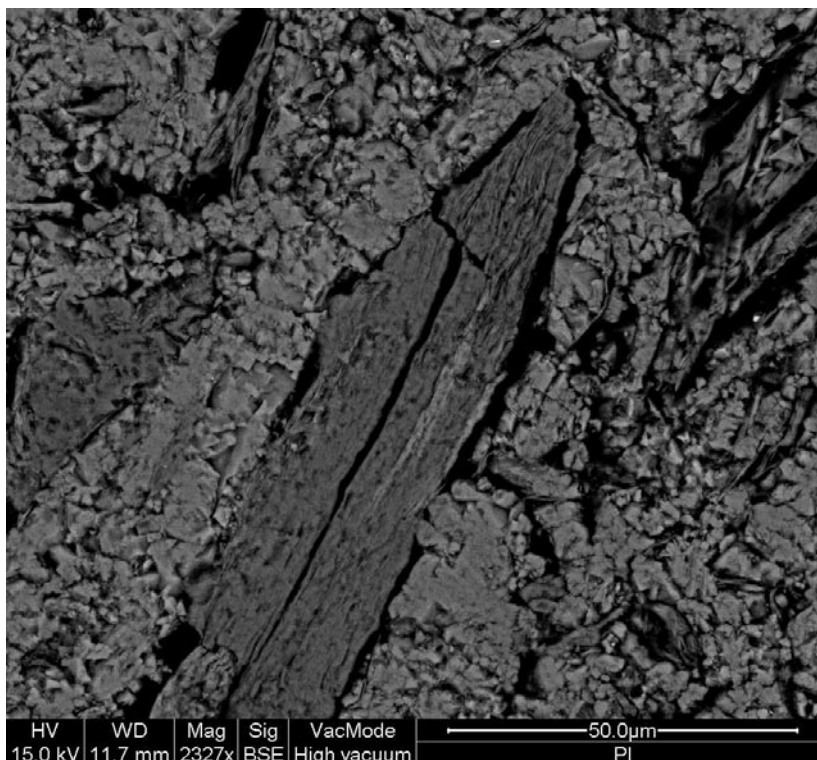


Figura 5.12: Immagine di un grano allungato (probabilmente mica) che presenta un sottile orlo isopaco di cemento microcristallino.

La natura mineralogica dei cristalli di matrice è carbonatica (calcite), come si evince al microscopio ottico e confermata dalle analisi chimiche in EDS; infatti, il Ca presenta valori compresi tra 70 e 95 moli % (in questo calcolo ed in tutti i successivi sono esclusi il carbonio e l'ossigeno).

In particolare, nei campioni IF e PI è presente Mg in moli % comprese tra 1 e 5 che consentono di definire il minerale come calcite basso magnesiaca; diversamente, nel campione FS è presente per lo più calcite molto ricca in Mg, considerata la quantità dello ione Mg con valori compresi tra 20 e 28 moli %.

Inoltre, in tutti i campioni, la matrice non arrossata presenta anche una consistente quantità di Fe, che si rileva con valori compresi tra 1 e 4 moli %.

Per quanto concerne gli altri cationi, in più della metà delle analisi sono emerse quantità molto variabili di Si e Al, con massimi valori pari, rispettivamente, a 18 e 9 moli% ed inoltre, poche moli percentuali di K e Na. Quest'ultimi elementi sono rilevati a causa della presenza di numerosi cristalli di minerali ad abito lamellare di probabile natura argillosa, che non sono ben discriminabili dal volume di misura della microsonda a causa delle piccole dimensioni dei cristalli di carbonato.

In alcuni cristalli di micrite è da segnalare la presenza di cavità subsferiche con dimensioni dell'ordine di 1 micron (figura 5.13).

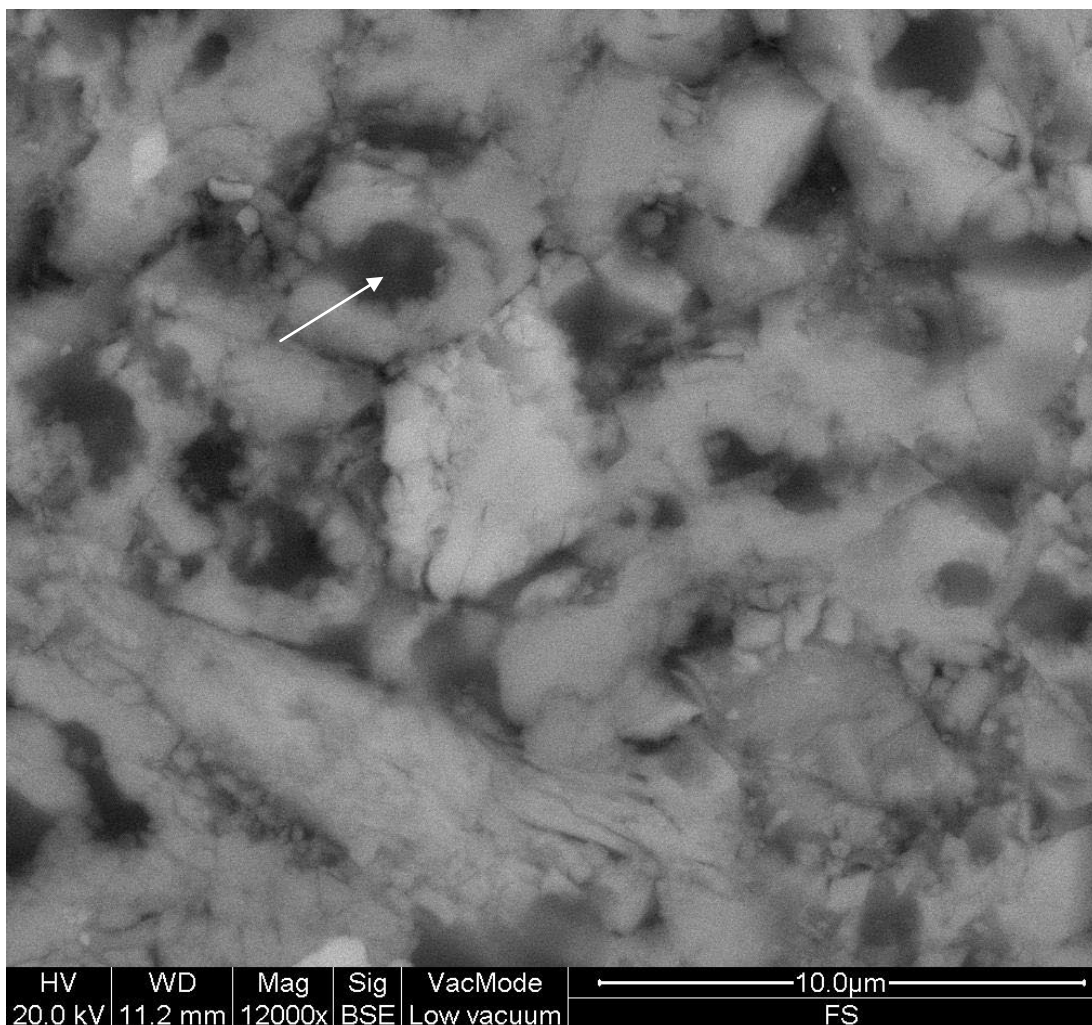
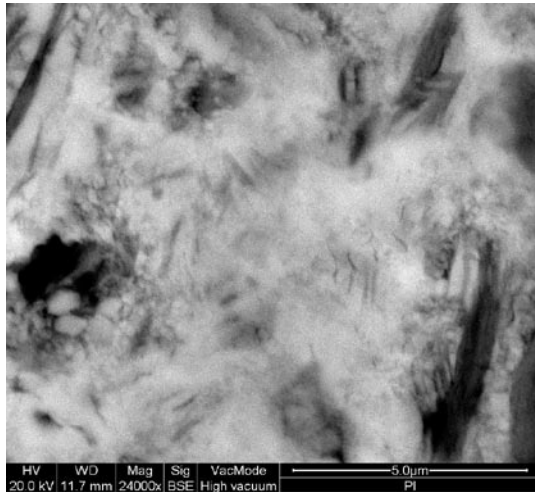
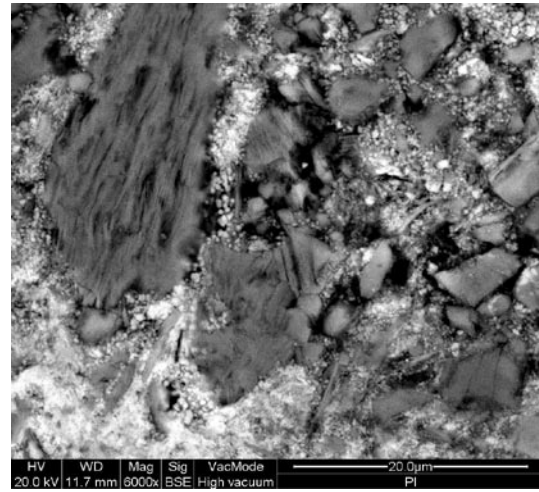


Figura 5.13: Cristalli di matrice carbonatica che presentano al loro interno cavità subsferiche.

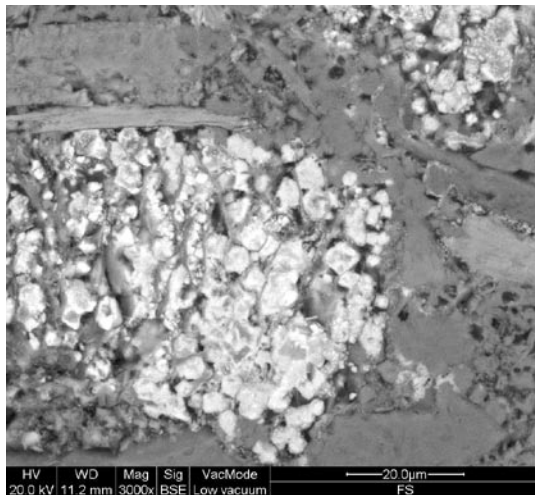
La matrice che appare arrossata al microscopio ottico è costituita da cristalli con morfologie molto variabili: anedrali, a nanosferee subeuedrali, a volte romboedrici, con dimensioni comprese tra 1 e 10 micron e spesso con forme di corrosione ai bordi (figura 5.14); inoltre, così come nella matrice non arrossata, sono in associazione a piccoli cristalli di minerali micacei.



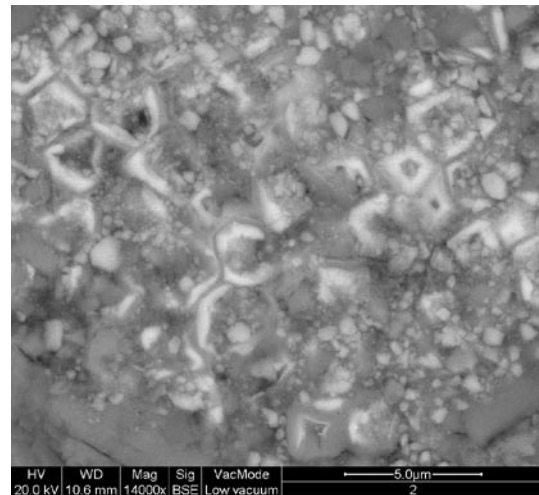
a



b



c



d

Figura 5.14: Cristalli carbonatici costituenti le porzioni di matrice arrossata (in associazione con piccoli cristalli di minerali micacei): 5.14a) cristalli anedrali; 5.14b) cristalli a nanosfere; 5.14c,d) cristalli romboedrici.

Così come per la matrice non arrossata, nella maggior parte dei casi, la matrice riempie le cavità presenti tra i grani senza una distribuzione preferenziale; localmente, però, i cristalli costituiscono concrezioni subsferiche con dimensioni dell'ordine di alcune decine di micron (figura 5.15).

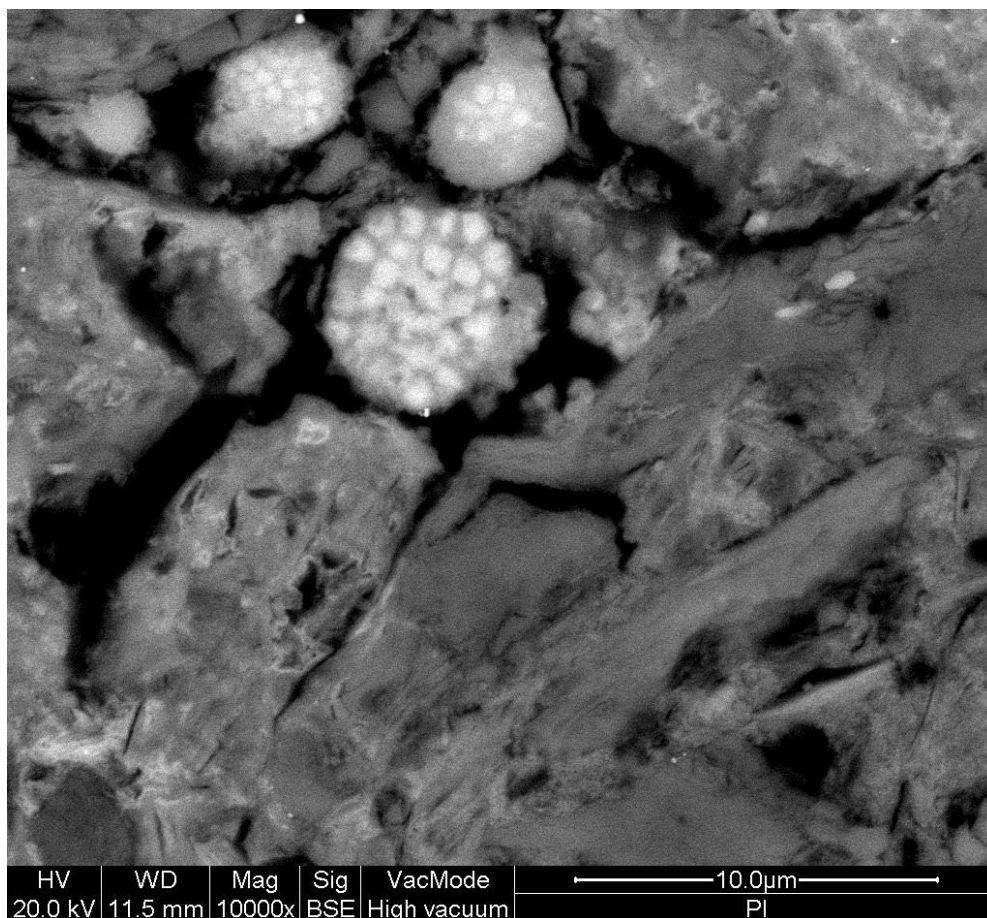


Figura 5.15: Concrezioni subsferiche costituite da microcristalli carbonatici ricchi in ferro.

Per quanto concerne la natura mineralogica dei microcristalli, le analisi chimiche in EDS suggeriscono che si può trattare di carbonati ricchi in ferro (cristalli anedrali e subedrali romboedrici) e di ossidi/idrossidi di ferro (microsfere). In tutti, il Fe presenta valori compresi tra 59 e 72 moli %, mentre il Ca valori decisamente più bassi; in particolare, questi ultimi sono compresi tra 1.02 e 8.68 moli % e sono comparabili a quelli di Mg, compresi tra 1 e 5 Mol%.

Inoltre, anche da queste analisi emerge una discreta presenza di minerali argillosi microdispersi.

Le analisi sui cementi a palizzata con sviluppo isopaco confermano come essi siano composti da cristalli di calcite spatica quasi pura che

rivestono cavità (figura 5.16); analoga composizione presentano i gusci dei foramiferi bentonici ricristallizzati.

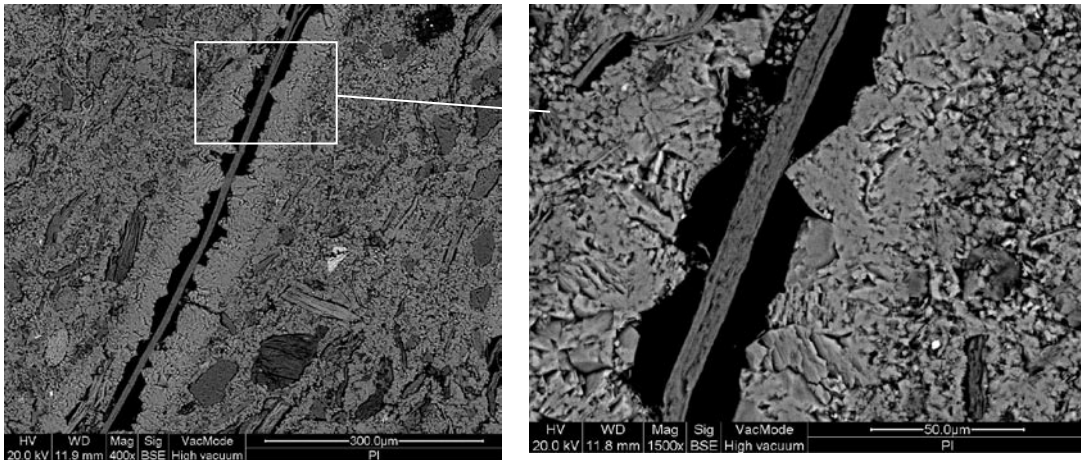


Figura 5.16: Cementi a sviluppo isopaco composti da cristalli di calcite spatica a palizzata, che rivestono una cavità.

5.5. Interpretazione:

I caratteri petrografici e le analisi al microscopio elettronico a scansione permettono di interpretare i livelli esaminati come il prodotto di cementazione sin-deposizionale, così come suggerito dalle caratteristiche morfologiche e composizionali della matrice carbonatica microcristallina.

In particolare, i campioni presentano tre principali tipologie petrografiche/morfologiche di cementi, ovvero gli orli isopaci microcristallini, i mosaici microcristallini ed i cristalli spatici isopaci a palizzata.

La loro cronologia relativa suggerisce che gli orli microcristallini si sono formati come primo evento, essendo direttamente attaccati ai grani, mentre seguono i cementi a mosaico, ed infine, quelli a palizzata; in particolare, la natura microcristallina nelle prime due generazioni di

cementi suggerisce la loro genesi in un ambiente diagenetico precoce sub-superficiale in condizioni freatiche, con una discreta circolazione dei fluidi.

In effetti, livelli cementati con caratteri simili a quelli analizzati sono comunemente documentati lungo i limiti delle parasequenze (Van Wagoner 1985, Van Wagoner *et alii*, 1990; Swift *et alii*, 1991; Posamentier & Allen, 1993; Helland-Hansen & Martinsen, 1996; Coe, 2003; Cattaneo & Steel, 2003; Storms & Hampson, 2005), i quali corrispondono a superfici di ingressione marina e loro formazione è attribuita alla precipitazione di cemento carbonatico nel corso della prolungata esposizione dell'interfaccia deposizionale e dei bassi tassi di sedimentazione (Tucker, 1993; Taylor *et alii*, 1995; Ketzer, 2002; Emery & Myers, 1996).

In particolare, le tre tipologie di cementi che caratterizzano i campioni sono state osservate anche da Ketzer (2002), che suggerisce la medesima interpretazione, così come si evince dal diagramma di figura 5.17, nel quale gli orli microcristallini rappresentano le prime fasi di precipitazione, lungo il limite di parasequenza, mentre i mosaici e poi i cristalli spatici a palizzata rappresentano fasi di graduale approfondimento del deposito.

E' importante notare, inoltre, che nei campioni esaminati nel presente lavoro sono del tutto assenti cementi a mosaico "poikilitici", che sono generalmente ricondotti a fasi diagenetiche di seppellimento avanzato.

Alla luce di ciò, i caratteri dei livelli esaminati sono in accordo con i dati stratigrafici, poichè suggeriscono come essi rappresentino *hardground* (Kim & Lee; Wilson & Palmer, 1992; Ketzer, 2002), ovvero il prodotto di

diagenesi marina precoce, legata ad innalzamenti relativi del livello marino.

Questa ipotesi trova conferma anche nella composizione dei cementi, poichè per i cristalli di calcite la presenza di ferro suggerisce come la loro precipitazione sia avvenuta in condizione anossiche, che hanno favorito l'ingresso di questo catione nel reticolo cristallino dei carbonati.

Infatti, in accordo con Ketzer (2002), i minerali carbonatici che cementano gli *hardground* sono calcite, dolomite e siderite, con quest'ultima che caratterizza le porzioni più distali, proprio per le più spinte condizioni anossiche e probabilmente anche per il più basso ammontare di materia organica (figura 5.17).

Una volta detto ciò, considerando che per le porzioni di matrice arrossata sono stati riconosciuti carbonati ricchi in ferro, si può ipotizzare che il campione PI approssimi la massima profondità raggiunta in sezione verticale.

Ciò poichè, quest'ultimo è stato campionato nella porzione mediana dell'associazione di prodelta, con la quale si chiude il *trend fining-upward* che ha inizio con il campione FS ed in effetti, presenta la maggiore quantità di carbonati ricchi in ferro nella matrice, a cui è riconducibile, dunque il suo maggiore grado di arrossamento.

Di conseguenza, il campione FS corrisponderebbe ad una superficie di trasgressione, così come suggerito dal rapido passaggio tra sabbie di fronte deltizia e peliti di prodelta; il campione PI è approssimabile alla superficie di massima trasgressione e la porzione mediana

dell'associazione di prodelta può essere così considerata come una zona di condensazione (*condensation zone*).

Diversamente, per quanto riguarda la presenza di calcite alto magnesiaca nel campione FS e di calcite basso magnesiaca nei campioni IF e PI, in letteratura non è chiaro il significato delle diverse quantità di Ca e Mg nella calcite né in termini ambientali, né in termini di variazioni relative del livello marino (Ketzer, 2002).

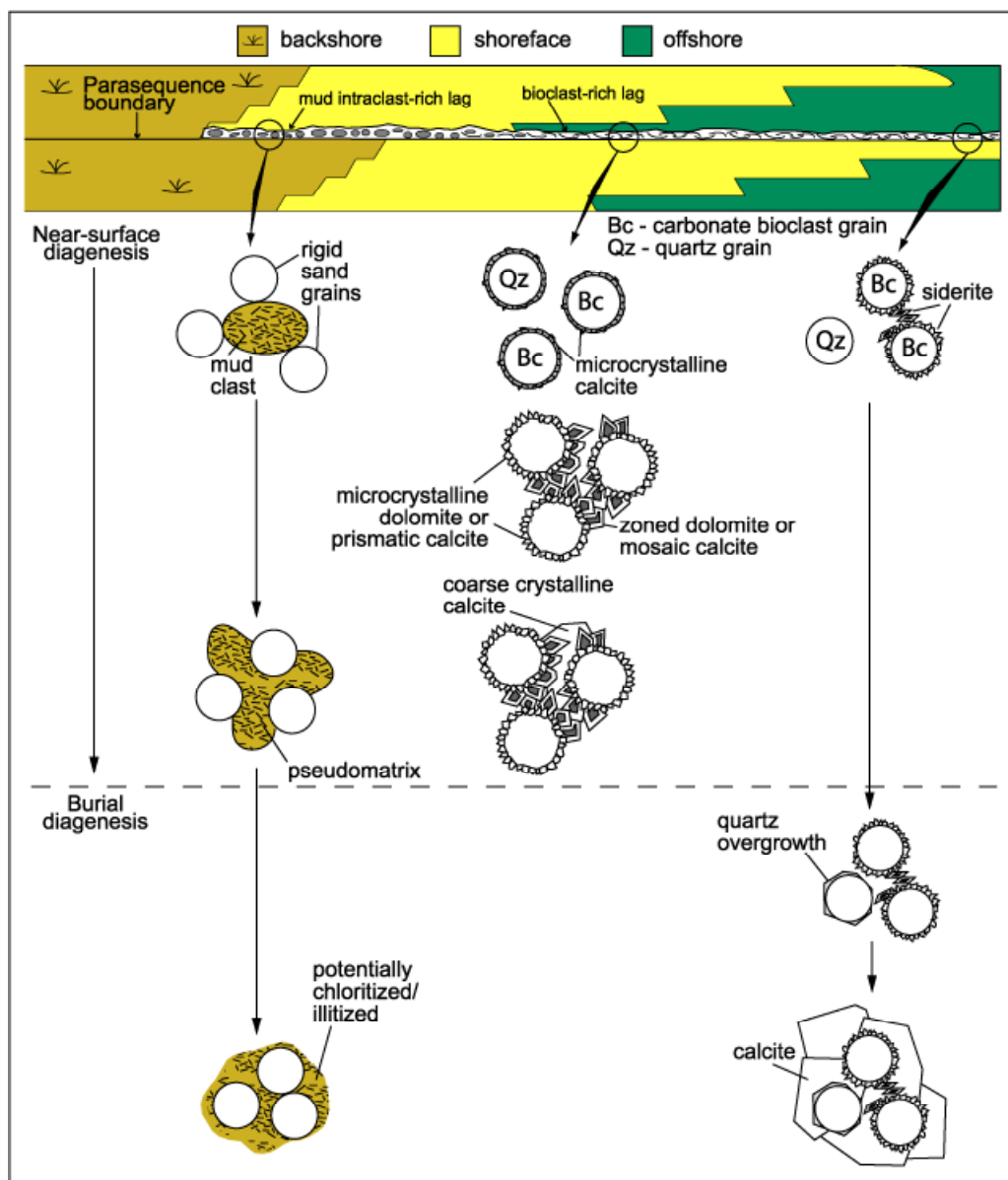


Figura 5.17: Diagramma mostrante la distribuzione delle alterazioni diagenetiche lungo i limiti di parasequenza (da Ketzer, 2002).

Infine, per quanto concerne la sorgente di ioni necessari alla formazione degli *hardgrounds*, essi derivano comunemente dalla dissoluzione dei bioclasti (Kim & Lee; Wilson & Palmer, 1992; Ketzer, 2002); infatti, nel caso in esame, considerando le diverse successioni studiate nell'area di studio, si è notato come i livelli cementati siano mediamente più spessi ed abbondanti nei depositi più fossiliferi.

Tuttavia, non è da escludere anche un contributo da rocce carbonatiche extrabacinali, che sono attualmente assenti lungo il margine silano del Bacino del Crati, ma sono, comunque, affioranti nelle porzioni meridionali di quest'ultimo; qui affiorano, infatti, i calcari miocenici appartenenti alla formazione del Calcarea di Mendicino.

Infine, poichè in alcuni cristalli di micrite è stata osservata la presenza di cavità subsferiche con dimensioni dell'ordine di 1 micron, è probabile che alla precipitazione dei carbonati abbia contribuito anche l'attività microbica.