

LE EVINOSPONGE: IPOTESI GENETICHE DI CEMENTI CALCITICI NELLA PIATTAFORMA LADINICA DELLE PREALPI LOMBARDE (Alpi Meridionali)

FLAVIO JADOUL* & SILVIA FRISIA*

Key-words: Carbonate platform cements, Diagenesis, Ladinian, Southern Alps, Italy.

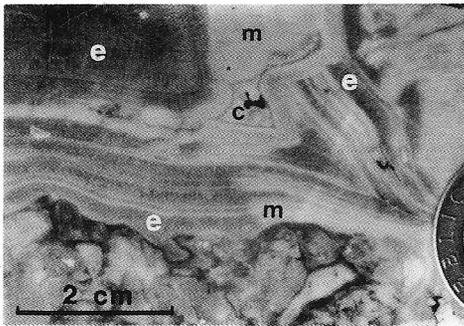
Abstract. The "evinosponge" are globose structures, both isolated and in anastomotic groups, whose size ranges from a few centimeters up to 3 meters. Each structure consists of several isopachous concentric crusts composed of low-Mg calcite crystals arranged in pseudofibres. Individual calcite crystals show irregular inter-crystalline boundaries, deformed twins and cleavages and strong undulose extinction. Located within the medium-upper part of the ladinian Esino Limestone, the "evinosponge" are distinctive of those facies, such as open subtidal, prograding margin and slope, which are characterised by a high primary porosity and are facing the deep basins of the Wengen Formation. Although the "evinosponge" are not pervasive in all the Esino Limestone platform margins, they represent up to the 70% of the whole rock in some areas. Formerly interpreted as fossil organisms (Stoppani, 1858), the "evinosponge" are here considered typical reef cements whose morphology developed through processes of dissolution and reprecipitation during early to burial diagenetic stages. The dissolution and reprecipitation processes took place in a mixed marine-meteoric water environment characterised by continuous changes in the chemical composition of the pore fluids and consequent fluctuations in carbonate saturation state. Furthermore, organisms such as the *Tubiphytes* and the *Spongiostromata* contributed to the development of the "evinosponge" acting as cement catalysts. Through the effects of perspiration and decaying organisms were also responsible for changes in the pore fluid chemistry towards undersaturation with respect to the more unstable phase of CaCO_3 . The cavity filling fibrous cements of the "evinosponge" underwent late diagenetic homogenisation and crystal deformation which conferred random optical characters to the calcite pseudofibres.

Introduzione.

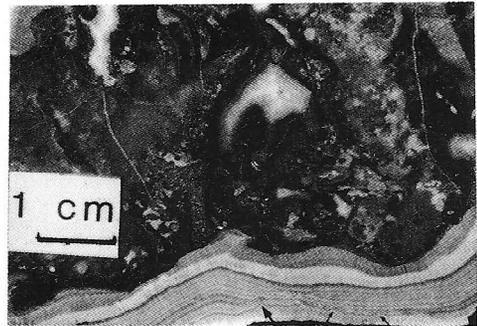
Nel 1858 A. Stoppani descrisse nelle piattaforme carbonatiche triassiche della Lombardia alcune strutture incrostanti, sessili e amorfe, consistenti in lamine concentriche di calcite fibrosa. Egli le interpretò come organismi appartenenti alle Spugne ed istituì per esse il genere *Evinospongia*, comprendente alcune specie distinte soprattutto in

* Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Milano, via Mangiagalli 34, 20133, Milano

** Lavoro eseguito nell'ambito dei programmi di ricerca del Centro di Studio per la Stratigrafia e Petrografia delle Alpi Centrali di Milano (C.N.R.) e in parte con fondi M.P.I. 60%.



6



7

Fig. 6 - Particolare di una grossa evinospongia con cementi calcitici ricristallizzati (e). Localmente essi hanno subito fenomeni di microspartizzazione diagenetica discordante o selettiva (m) lungo gli involucri delle croste. È seguita poi una fase di dissoluzione con formazione di piccole cavità cementate da calcite spatica (c), luminescente e zonata in CL, connessa alla diagenesi tardiva e profonda. Al nucleo delle stesse è presente dolomite bianca. Calcare di Esino superiore, strada per cava Mecca, Camerata Cornello, Val Brembana.

Detail showing the recrystallized calcite cements (e) of a large evinospongia. The cement crusts are locally microsparitized (m). A late diagenetic dissolution phase with development of cavities cemented by sparry calcite (c) (in CL zoned, with bright-luminescence) cuts the previous structures. Baroque, white dolomite is present in the structure of these cavities.

Fig. 7 - Sezione lucida di un packstone grossolano bio- intraclastico localmente bindstone, con piccole cavità riempite da sedimenti interni intraclastici e/o cementi calcitici in due generazioni. Sul bordo inferiore si osserva il contatto discordante e parzialmente stilolitico con le croste calcitiche dell'evinospongia. In esse sono visibili (freccia) alcune discontinuità tra le varie fasi di precipitazione dei cementi (bioerosioni da attività batterica?) e la tipica alternanza di lamine chiare e grigio-scure. Calcare di Esino medio- superiore, Circo di Moncodeno, Grigna settentrionale.

Polished section showing a coarse bio-intraclastic packstone to bindstone with small cavities filled by intraclastic internal sediments and/or two generations of calcite cements. Note the unconformity and partial stylolitization at the boundary with the evinospongia. Arrows show an unconformity between several phases of cement precipitation (bioerosion of bacterial activity?) and the typical sequence of dark and light gray laminae.

7). In questa sequenza si intercalano talora veli microspartitici concentrici, chiari e scuri, disposti anche in plaghe irregolari che tagliano le fibre calcitiche (Fig. 6).

Le strutture più piccole (fino a 10 cm circa di sviluppo) si formano in cavità originali inter-intragranulari e di framework, spesso allargate successivamente per dissoluzione e/o erosione. Possono essere sia isolate, che collegate a formare insiemi anastomotici pervasivi. Il loro nucleo è sovente occupato da cristalli romboidali di calcite spatica chiara (Fig. 10a) e più raramente da romboedri di dolomite bianca, spesso ferrifera.

Le strutture di dimensioni maggiori (fino a 3 metri di sviluppo) hanno geometria più marcatamente mammellonare e sovente presentano nucleo vuoto. Il loro sviluppo non sembra controllato dalla porosità primaria, ma connesso a processi di dissoluzione/erosione e, localmente, a fratture- faglie sinsedimentarie. Infatti esse tagliano sia le

base alle dimensioni (*Evinospongia cerea*, *E. vesiculosa*, *E. esinensis*). La loro natura inorganica ("cone in cone structures") fu riconosciuta in seguito da Cosjìn (1928) e Hofsteenge (1932). Tuttavia il nome "*Evinospongiae*" rimase nella letteratura per denominare le cavità riempite da cementi costituenti croste concentriche formate da cristalli di calcite spatica e fibrosa, che si incontrano nelle facies più massicce di età ladinica del Calcare di Esino. Lo studio della genesi di queste cavità e dei loro riempimenti fu tuttavia trascurato da allora fino ad oggi.

Strutture simili caratterizzano anche le piattaforme carbonatiche ladiniche delle Alpi Calcareae Settentrionali; sono indicate con il nome di "Grossooliths" e sono state oggetto di approfondite indagini. Leuchs (1928) le considerò infatti cementi di riempimento di cavità, interpretazione ripresa da German nel 1971. Secondo Brandner & Resch (1981) le grossooliti del Wettersteinkalk (Trias medio) si sarebbero sviluppate nelle cavità primarie del reef e in quelle intergranulari delle megabrecce. Queste cavità sarebbero state riempite da croste isopache di cementi di spessore decimetrico, accumulatisi per diverse generazioni di sparite fibrosa alternate a veli sottili di dolomite finemente cristallina.

Il cemento calcitico di tali croste ha una struttura radiassiale-fibrosa molto marcata, che starebbe ad indicare (Kendall & Tucker, 1973) la sostituzione di un cemento originario, probabilmente aragonitico (Assereto & Folk, 1980). McKenzie & Lister (1983), sulla base di uno studio isotopico dei cementi delle grossooliti, hanno proposto la precipitazione delle croste di sparite fibrosa da acque dolci. I veli dolomitici sarebbero precipitati, invece, da acque ipersaline. Gli autori citati non hanno specificato se i cementi calcitici fibrosi abbiano sostituito un precursore di origine marina, per dissoluzione-riprecipitazione, durante la diagenesi in ambiente meteorico-freatico.

Altre strutture, simili per aspetto esterno alle evinosponge ed alle "Grossooliths", sono state osservate nelle piattaforme ladiniche delle Dolomiti (Gaetani et al., 1981), soprattutto in facies di pendio non interessate da diagenesi meteorica. Le evinosponge potrebbero in parte ricollegarsi alle "stromatactis" degli autori inglesi che si formano in carbonati fini nelle cavità dovute a espulsione di acqua e/o a decomposizione di parti molli organiche e poi cementate in ambiente marino.

Le evinosponge presentano tuttavia alcune caratteristiche abbastanza particolari, che non ne permettono una interpretazione univoca:

- 1) la pervasività, che implica fenomeni di dissoluzione intensiva da parte di acque sottosature in carbonato di calcio (aragonite e Mg calcite);
- 2) la natura del cemento, che non è riconducibile ad una calcite radiassiale o radiassiale-fibrosa o ad altri tipi che possano essere considerati calciti di sostituzione;
- 3) la mancanza di veli dolomitici o di abbondante sedimento interno, tipici rispettivamente delle grossooliti e delle "stromatactis".

La loro genesi è inoltre strettamente legata alla evoluzione diagenetica del Calcare di Esino, il quale presenta, alla sommità, testimonianze di instabilità tettonica con esposizioni subaeree e conseguenti fenomeni carsici.

In base ad una accurata revisione delle più recenti teorie sulla cementazione di ca-

vità nei corpi carbonatici, abbiamo cercato di spiegare la genesi di tali strutture, formulando varie ipotesi, controllate anche con osservazioni di terreno e con dati sperimentali.

Inquadramento stratigrafico delle evinosponge.

Oggetto del nostro studio sono principalmente le evinosponge del Calcere di Esino della Grigna settentrionale (Valsassina) e della Val Brembana (Fig. 1, 2). In queste aree, durante il Ladinico, la piattaforma del Calcere di Esino si evolve a buildup (Wilson, 1975), con conseguente sviluppo di facies subtidali con patch reefs costituiti da *Porostromata*, *Tubiphytes* e di facies di margine progradante-pendio con bindstones e bafflestones a *Tubiphytes*, *Porostromata*, Coralli e Spugne. Queste ultime litofacies sono generalmente poco conservate per via delle elisioni tettoniche.

Le evinosponge si osservano soprattutto nella facies di retromargine con patch reefs. In alcuni casi si sviluppano localmente anche nelle facies inter-sopratidali, che si instaurano alla sommità del Calcere di Esino, associate ad altre cavità di dissoluzione (sheet cracks), emisferoidi con raggioni di calcite aciculare, bird's eyes e tepees. Litofacies queste che possono costituire l'equivalente del Calcere Rosso brembano (Assereto &

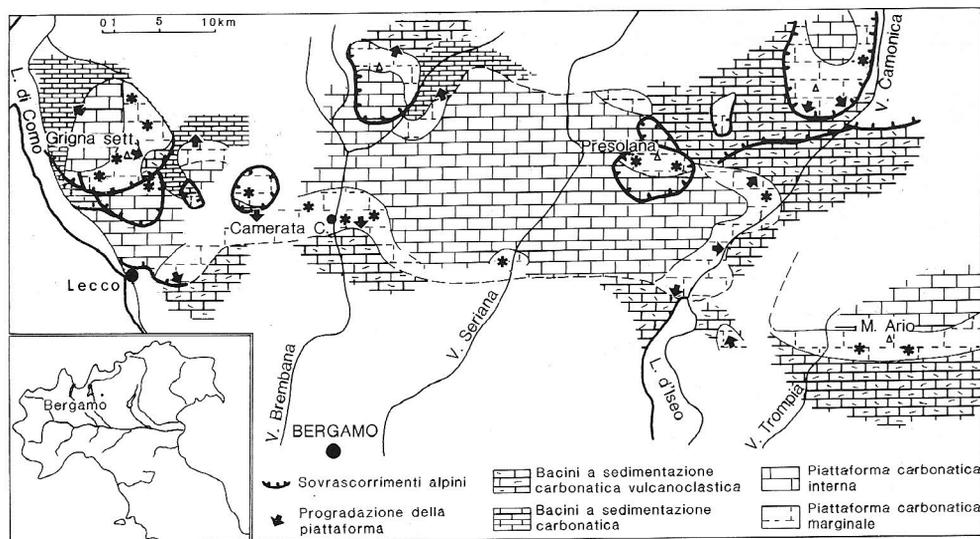


Fig. 1 - Ubicazione geografica dell'area studiata e distribuzione areale delle evinosponge (asterischi) nel quadro paleogeografico del Ladinico in Lombardia (modificato da Brusca et al., 1982). La delimitazione della piattaforma carbonatica del Calcere di Esino è stata tracciata nel momento di massima espansione dei bacini delle formazioni di Wengen e di Perledo Varenna. Schema non palinospastico con i principali raccorciamenti alpini che interessano le successioni medio-triassiche. Geographic setting of the studied area, ladinian paleogeography in Lombardy and evinosponge distribution in Esino Limestone (asterisks).

Kendall, 1977; Assereto et al., 1977; Gaetani et al., 1987).

In vetta alla Grigna settentrionale, in corrispondenza del rifugio Brioschi, è presente un esteso e articolato reticolo di evinosponge di dimensioni sino a metriche; a volte il loro nucleo è occupato da sedimenti grigio-rosati, laminati e geopetali, collegabili a un paleocarsismo sviluppatosi al tetto della piattaforma ladinica.

Le evinosponge di dimensioni anche superiori al metro si osservano però soprattutto in Val Brembana (Camerata Cornello), concentrate verso il tetto del Calcarea di Esino, dove si ha una paleosuperficie sommitale più irregolare, con filoni, fratture e cavità pure di tipo carsico, talora riempite da argilla verde, rossastra e da sedimenti dolomitici. Il Calcarea di Esino sommitale presenta inoltre quasi ovunque frequenti tasche e/o plaghe dolomitizzate spesso in corrispondenza di faglie; Assereto et al. (1977) propongono per esse un processo di dolomitizzazione "Dorag" (Badiozamani, 1973).

La sequenza regressiva regionale della piattaforma ladinica superiore, il diffuso paleocarsismo osservabile alla sua sommità (Assereto et al., 1977), la discontinuità semplice, quasi ovunque presente tra il Calcarea di Esino e le soprastanti unità del Calcarea Rosso, Formazione di Breno, Calcarea Metallifero Bergamasco, confermano che anche nella successione lombarda si è verificato alla fine del Ladinico (Biddle, 1984; Haq et al., 1987) un consistente abbassamento eustatico. Nella Lombardia l'abbassamento del livello di

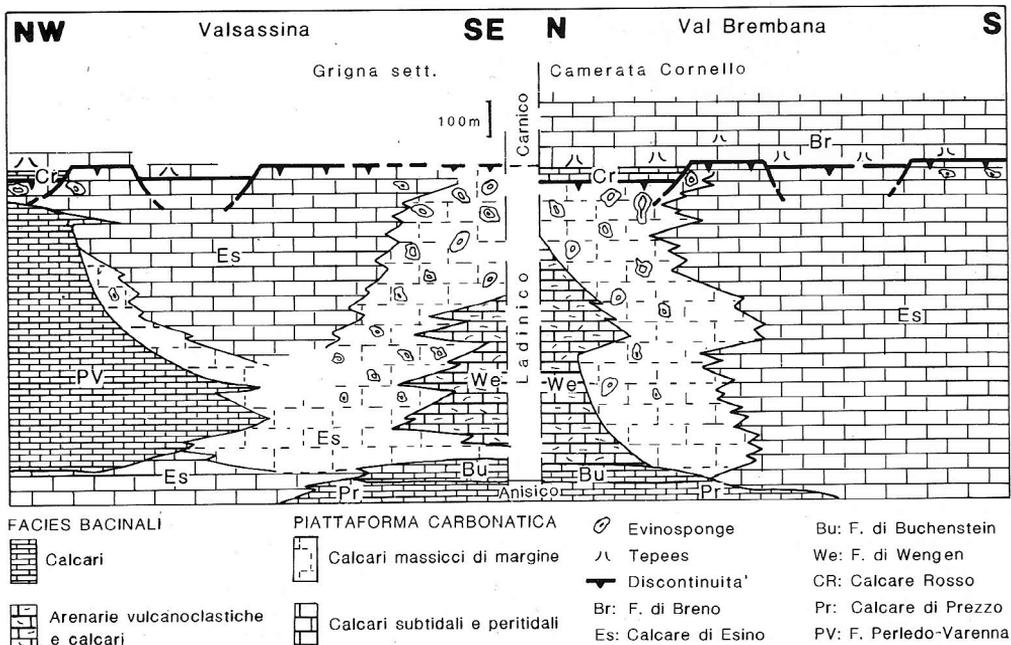


Fig. 2 - Schemi stratigrafici della successione ladinica nelle aree studiate (Valsassina e Val Brembana). The Ladinian stratigraphic sequence in the studied area.

base è verosimilmente associato con la fase vulcano-tettonica, che caratterizza l'inizio dell'età carnica (Jadoul & Rossi, 1982). Il calo relativo del livello marino, calcolato sulla base del limite stratigrafico inferiore delle cavità carsiche, supera localmente i 100 metri.

I cementi di cavità nel Calcare di Esino

1 Evinosponge.

Caratteri morfologici. Nelle litofacies subtidali con patch reefs, prospicienti un margine biocostruito, si osservano generalmente strutture globose, di forma irregolare, spesso mammellonare, di dimensioni variabili da pochi centimetri a qualche metro (Fig. 3, 4). Esse consistono di un'alternanza di croste concentriche isopache di calcite pseudofibrosa di colore grigio chiaro e croste analoghe, di spessore inferiore, grigio-scure (Fig.

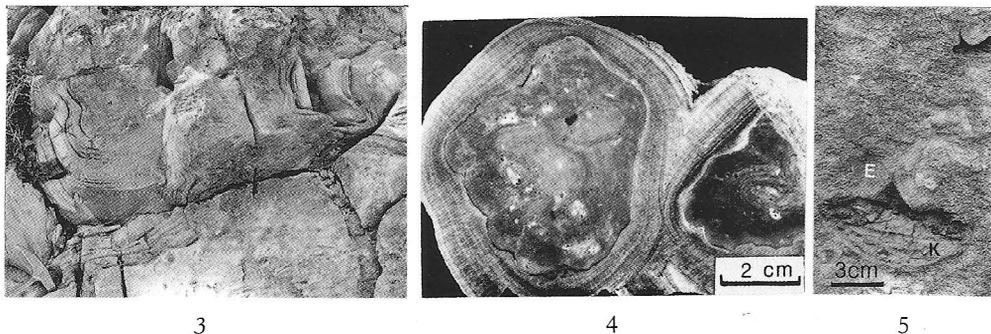


Fig. 3 - Grande evinospongia con tipiche croste isopache mammellonari, costituite da involucri concentrici di cementi calcitici alternati con lamine microspartitiche. Calcare di Esino superiore, strada per cava Mecca, Camerata Cornello, Val Brembana.

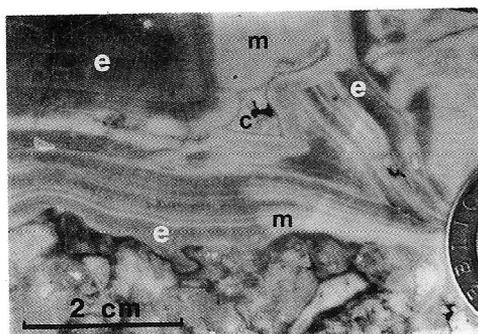
Large sized evinospongia showing the typical mamelons consisting of isopachous concentric crusts formed by pseudofibrous calcite cements alternating with microsparite laminae.

Fig. 4 - Sezione lucida di mammelloni di evinosponge. La roccia incassante è un bindstone a *Spongiostromata*; si osservi il contatto stilolitico irregolare con le croste concentriche, generalmente isopache dell'evinospongia. Calcare di Esino medio- superiore, Circo Moncodeno, Grigna settentrionale.

Polished section showing evinosponge mamelons. "Host rock" is a *Spongiostromata* bindstone. Note the irregular, stylolite-like, contact with the evinosponge crusts. Middle-upper Esino Lst., Moncodeno, Grigna settentrionale.

Fig. 5 - Piccola evinospongia (E) tagliata dai sedimenti interni laminati, in parte dolomitici, che riempiono piccole cavità (K) collegate con l'emersione al tetto del Calcare di Esino. Paglio Pignolino, Val Brembana.

Small evinospongia (E) cross-cut by laminated and partially dolomitized, internal sediments filling small cavities (K) connected with the upper ladinian emersion of the Esino Lst.



6



7

Fig. 6 - Particolare di una grossa evinospongia con cementi calcitici ricristallizzati (e). Localmente essi hanno subito fenomeni di microspartizzazione diagenetica discordante o selettiva (m) lungo gli involucri delle croste. È seguita poi una fase di dissoluzione con formazione di piccole cavità cementate da calcite spatica (c), luminescente e zonata in CL, connessa alla diagenesi tardiva e profonda. Al nucleo delle stesse è presente dolomite bianca. Calcare di Esino superiore, strada per cava Mecca, Camerata Cornello, Val Brembana.

Detail showing the recrystallized calcite cements (e) of a large evinospongia. The cement crusts are locally microspartitized (m). A late diagenetic dissolution phase with development of cavities cemented by sparry calcite (c) (in CL zoned, with bright-luminescence) cuts the previous structures. Baroque, white dolomite is present in the structure of these cavities.

Fig. 7 - Sezione lucida di un packstone grossolano bio- intraclastico localmente bindstone, con piccole cavità riempite da sedimenti interni intraclastici e/o cementi calcitici in due generazioni. Sul bordo inferiore si osserva il contatto discordante e parzialmente stilolitico con le croste calcitiche dell'evinospongia. In esse sono visibili (freccia) alcune discontinuità tra le varie fasi di precipitazione dei cementi (bioerosioni da attività batterica?) e la tipica alternanza di lamine chiare e grigio-scure. Calcare di Esino medio- superiore, Circo di Moncodeno, Grigna settentrionale.

Polished section showing a coarse bio-intraclastic packstone to bindstone with small cavities filled by intraclastic internal sediments and/or two generations of calcite cements. Note the unconformity and partial stylolitization at the boundary with the evinospongia. Arrows show an unconformity between several phases of cement precipitation (bioerosion of bacterial activity?) and the typical sequence of dark and light gray laminae.

7). In questa sequenza si intercalano talora veli microspartitici concentrici, chiari e scuri, disposti anche in plaghe irregolari che tagliano le fibre calcitiche (Fig. 6).

Le strutture più piccole (fino a 10 cm circa di sviluppo) si formano in cavità originali inter-intragranulari e di framework, spesso allargate successivamente per dissoluzione e/o erosione. Possono essere sia isolate, che collegate a formare insiemi anastomotici pervasivi. Il loro nucleo è sovente occupato da cristalli romboidali di calcite spatica chiara (Fig. 10a) e più raramente da romboedri di dolomite bianca, spesso ferrifera.

Le strutture di dimensioni maggiori (fino a 3 metri di sviluppo) hanno geometria più marcatamente mammellonare e sovente presentano nucleo vuoto. Il loro sviluppo non sembra controllato dalla porosità primaria, ma connesso a processi di dissoluzione/erosione e, localmente, a fratture- faglie sinsedimentarie. Infatti esse tagliano sia le

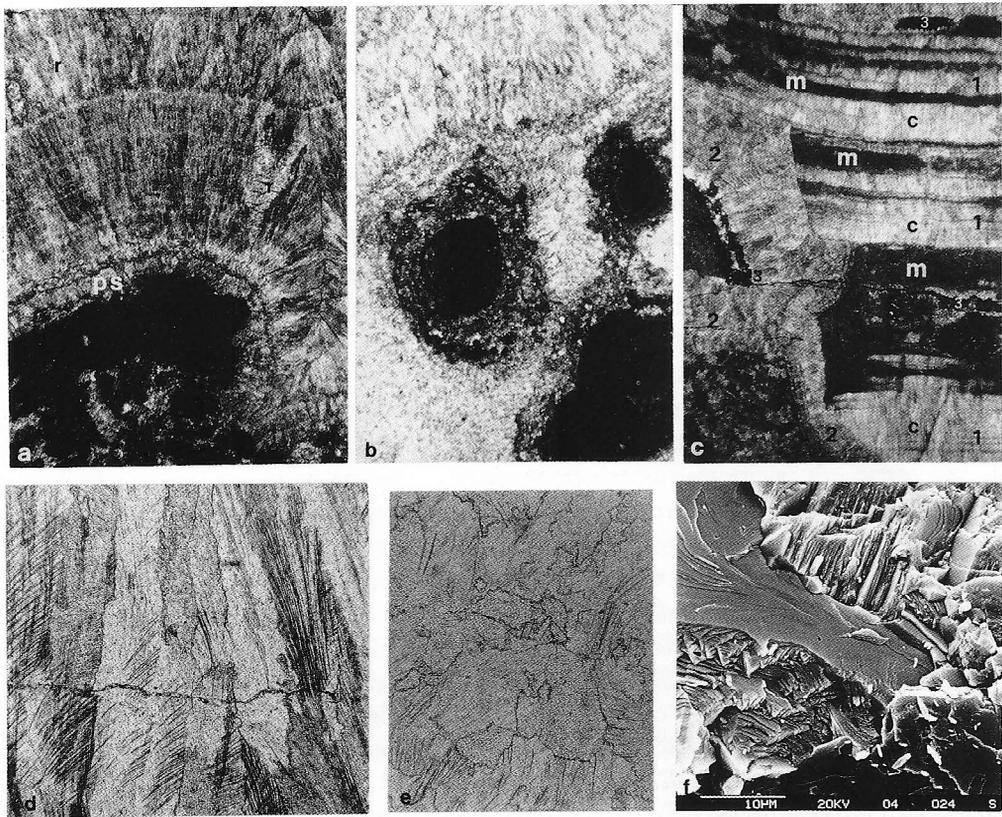


Fig. 8 - Caratteri di alcune microfacies delle evinosponge.

- a) Contatto concordante tra la roccia incassante costituita da un bindstone a *Spongiostromata* e intraclasti e le croste isopache di LMC. Si noti la ricristallizzazione del cemento, che tende ad assumere un aspetto allungato pseudofibroso (r) e che oblitera la disposizione in sottili involucri concentrici delle croste. Al contatto con l'incassante è presente una zona pseudosparitica (ps) con parziale dolomitizzazione. Calcarea di Esino superiore, Circo Moncodeno, Grigna settentrionale; x 7.
- b) Bindstone a *Spongiostromata* e *Tubiphytes* con sviluppati cementi spatici e pseudofibrosi delle evinosponge. Il contatto tra i grani della microfacies è sempre ricristallizzato. Calcarea di Esino sommitale, Malegno, Val Camonica; x 7.
- c) Particolare di una crosta di grande evinospongia (Fig. 6), costituita da una fitta alternanza (1) di involucri microsparitici scuri (m) e di croste di calcite pseudofibrosa chiara (c). Una ricristallizzazione incipiente ha interessato i cementi e in parte le microspariti. L'intera sequenza di lamine scure e chiare è nettamente tagliata da cementi calcitici più tardivi (2); segue una fase di fratturazione, cui si può associare la messa in posto di materia bituminosa e di dolomite ferrifera (3). Calcarea di Esino superiore, strada per cava Mecca, Val Brembana; x 7.
- d,e) Particolari petrografici dei subcristalli che compongono le croste calcitiche dell'evinospongia: (d) sezione parallela all'allungamento (asse c); (e) sezione trasversale all'allungamento. Si osservino in entrambe le foto i contatti irregolari compenetrati tra i subcristalli ed il clivaggio deformato; x 42.
- f) Aspetto della crescita caotica dei subcristalli di calcite che costituiscono le evinosponge, visto al SEM.
- Evinosponge microfacies.

strutture originarie del sedimento che le cavità intergranulari già cementate (Fig. 3, 7). Nelle strutture più grandi le croste concentriche sono formate da fibre di calcite generalmente più scure e più lunghe di quelle presenti nelle strutture più piccole; sono anche più frequentemente interrotte da lamine e plaghe microspartiche (Fig. 6, 8c).

Di solito il contatto tra la roccia incassante e i primi cementi fibrosi della struttura-cavità è netto ed irregolare, spesso sottolineato da veli microdolomitici discontinui, da stiloliti (Fig. 4), e/o da fenomeni di ricristallizzazione (Fig. 8b). La prima crosta calcitica regolarizza il contorno della cavità: riempie le depressioni e si assottiglia sulle sporgenze (Fig. 7). Verso il contatto con la roccia madre compaiono frequenti pseudospariti indicanti una avvenuta ricristallizzazione (Fig. 8a).

Dopo un contatto spesso marcato da fenomeni di stilolitizzazione e ricristallizzazione, la crosta successiva è isopaca e ha spessori che variano da 0,1 a 1 cm a seconda dell'ampiezza della cavità. In alcuni campioni questa seconda crosta appare costituita da veli concentrici di calcite microspartica; in altri è composta da calcite spatica pseudofibrosa analoga a quella delle croste successive. Più internamente la cavità viene quasi occlusa da una successione di alternanze centripete di croste di calcite pseudofibrosa grigio-chiara (con spessore variabile da 2 mm a 1 cm) e di lamine di calcite pseudofibrosa grigio-scura. Nella medesima area di affioramento l'ordine regolare delle alternanze può essere mantenuto in tutte le evinosponge dello stesso livello stratigrafico. La forma stessa delle cavità costringe i cristalli nelle singole croste ad una crescita competitiva, quindi sono frequenti i fenomeni di "crescita cannibalistica" (Fig. 8a).

Caratteri petrografici. All'osservazione al microscopio ciascun involucro concentrico appare costituito da fibre di calcite lunghe da 0,5 a 10 mm e larghe 0,1 - 0,2 mm (le dimensioni minori si hanno nelle evinosponge più piccole). Le fibre presentano caratteristiche differenti secondo i campioni. Comunemente sono costituite da un singolo cristallo, con forte estinzione ondulata, clivaggi e piani di geminazione deformati (Fig. 8d, e).

Qualche volta sono anche formate da più cristalli, orientati diversamente e molto deformati. I contatti tra le fibre sono irregolari, con caratteristiche indentazioni analo-

a) Boundary between the host rock (*Spongiostromata* bindstone with intraclasts) and the isopachous evinosponge cement crusts. Recrystallization (r) confers a pseudofibrous habit to the calcitic cements partially obliterating the original structures. The boundary with the host rock is underlined by pseudosparite and dolomite (ps); x 7.

b) *Tubiphytes*, *Porostromata* bindstone and evinosponge cements. Note stylolites at the intergranular boundaries; x 7.

c) Detail showing the crust of a large evinospongia consisting of alternating (1) dark gray microspartite laminae (m) and pseudofibrous calcite crusts (c). Note the partial recrystallization affecting both (m and c). The whole laminar sequence is cross cut by late sparitic cement (2). It follows the development of fractures and microfractures (3) connected to the precipitation of ferroan dolomite and or bitumen; x 7.

d,e) Detail of the crystals forming the evinosponge crusts: (d) section cut parallel to the c axis; (e) perpendicular to the c axis. Note the strongly irregular intercrystalline boundaries and deformed cleavages; x 42.

f) SEM micrograph showing the chaotic growth of the evinosponge calcite subcrystals.

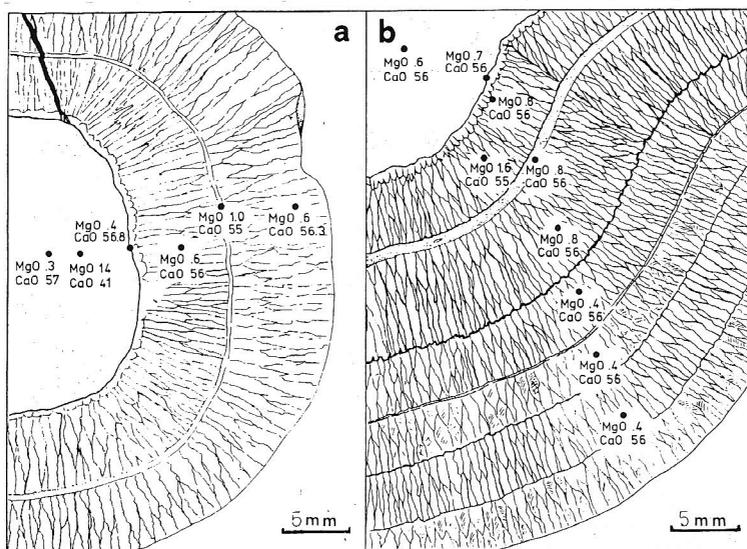


Fig. 9 - a) Analisi chimica alla microsonda di una tipica evinospongia raccolta da Stoppani in Grigna settentrionale e classificata come *Evinospongia cerea* (Stoppani, 1858).
 b) Analisi chimica di una grande evinospongia con cavità geodica ed evidenti fenomeni di ricristallizzazione (vedi Fig. 6). Val Brembana. Si noti il chimismo omogeneo delle croste costituite da calcite pseudomorfa in entrambi i campioni.
 Evinospongia microprobe chemical analysis. Note the homogeneous composition. a) Stoppani's typical *Evinospongia cerea*. Grigna settentrionale. b) Large evinospongia (Fig. 6). Brembana Valley.

ghe alle stiloliti (Fig. 8d, e). Nelle fibre non si distinguono "trend" di estinzione caratteristici, che possano permettere la "classificazione".

In alcuni campioni le singole fibre derivano dalla coalescenza di subcristalli (*sensu* Kendall, 1985), che con la loro particolare orientazione conferiscono a ciascuna di esse la caratteristica estinzione ondulata centripeta della "radial fibrous calcite" (Bathurst, 1959, 1982; Kendall & Tucker, 1973). Accanto a queste, coesistono altre fibre la cui estinzione ondulata non segue uno schema definito, ed altre ancora che presentano estinzione ondulata centrifuga, caratteristica della "fascicular optic calcite" (Kendall, 1977). La calcite dei cementi delle evinosponge presenta qualche somiglianza con la "coconut meat calcite" (CMC) descritta da Assereto & Folk (1980) nel Calcare Rosso e caratterizzata da radiassialità poco sviluppata e clivaggi deformati; tuttavia nei cristalli calcitici delle evinosponge mancano le ricche inclusioni fluide della CMC (e gli eventuali segni ottici positivi).

Analisi in Catodoluminescenza (CL). I cementi delle evinosponge sono uniformemente non-luminescenti per tutto lo spessore della piattaforma dell'Esino, sia nelle strutture di piccole dimensioni, che in quelle più grandi. Non c'è differenza tra le croste chiare e quelle scure, nè si ha luminescenza negli intervalli microspartitici ad esse interca-

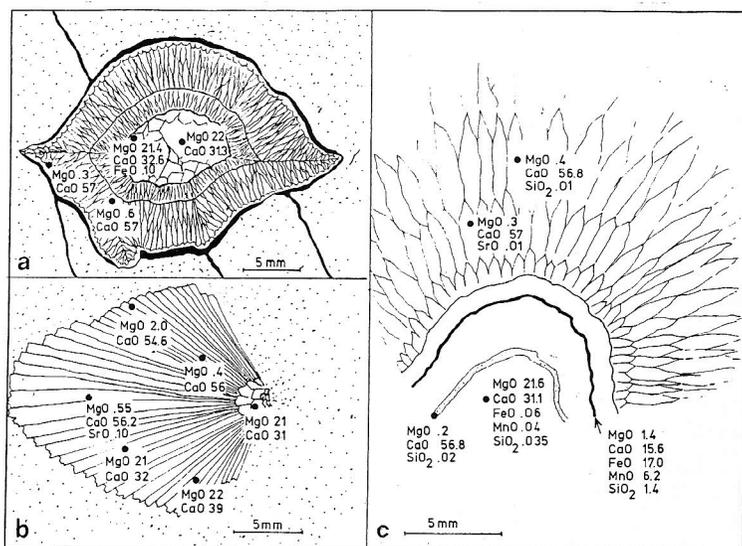


Fig. 10 - a) Analisi chimiche di una piccola evinospongia il cui nucleo è occupato da dolomite spatica tardiva. Grigna settentrionale.
 b) Analisi chimiche degli emisferoidi ("raggioni"). Si noti la presenza di Sr e di plaghe ricche in Mg (probabile dolomite).
 c) Analisi chimica di comparazione di uno speleotema calcitico quaternario coesistente con le evinosponge nel Calcare di Esino della Val Brembana (Fig. 9b). Le croste sono formate da cristalli di calcite spatica con terminazione romboedrica, privi di deformazioni.
 a) Microprobe chemical analysis of a small evinospongia with dolomite in the nucleus.
 b) Microprobe analysis of the "raggioni". Note the presence of Sr and Mg.
 c) Comparative microprobe analysis of a quaternary calcitic speleothem developed in Esino Lst. containing evinosponge. Brembana Valley.

lati. Tuttavia la CL ha rivelato una serie fittissima di microfratturazioni (Jadoul, 1987), che interessano sia i cementi che la roccia madre, riempite da una calcite caratterizzata da una luminescenza giallo arancione così intensa da poter conferire una diffusa luminescenza all'area circostante, altrimenti opaca. Anche le stiloliti sono sottolineate da una calcite con luminescenza molto simile a quella osservata nelle microfratture.

Analisi chimiche. Sono state eseguite alla microsonda ARSL del CNR, presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Milano ed hanno rivelato una composizione molto omogenea dei cementi in esame. Lungo le numerose traverse eseguite dal bordo esterno verso il nucleo della evinospongia, non si sono osservate, nelle strutture più grandi, variazioni apprezzabili del contenuto in Ca, Mg ed elementi in traccia. In quelle più piccole, invece, si può talora avere un incremento del contenuto in Mg verso il centro, dove spesso si sviluppano cristalli romboedrici di dolomie che riempiono la geode (Fig. 10a). La calcite fibrosa dei cementi ha un basso contenuto di Mg (Low-Mg Calcite) (LMC) e lo Sr non è sufficiente per essere rilevato dallo strumento. I risultati delle analisi sono riportati in Fig. 9 e 10.

Analisi isotopiche. Presso l'ETH di Zurigo è stata anche eseguita l'analisi isotopica

di decine di campioni di roccia incassante e dei tipi di cementi che costituiscono le evinosponge. L'elaborazione di questi dati e i risultati ottenuti verranno discussi in un lavoro in corso di stampa in collaborazione con H. Weissert, sulla diagenesi profonda del Calcarea di Esino. Si può anticipare qui che i valori del $\delta^{18}O$ variano tra -5 e -10‰ PDB in Val Brembana e tra -7 e -11‰ nella Grigna Settentrionale. Quelli del $\delta^{13}C$ sono sempre compresi tra +2 e -0.1‰ PDB.

2 Raggioni.

Soprattutto nella parte alta del Calcarea di Esino, alle evinosponge si associano cristalli scuri di abito grossolanamente aciculare, riuniti a formare emisferoidi, chiamati da Assereto & Folk (1980) "raggioni". Di solito questi sono situati tra la parete della cavità e le prime fasi di cementazione delle evinosponge e crescono in senso centripeto verso il nucleo della struttura. Le analisi chimiche hanno rivelato tracce di Sr (Fig. 10b) nei "raggioni", anche se l'abito aciculare originale dei cristalli formanti gli emisferoidi è sostituito da calcite spatica e, in parte, da dolomite. In CL i "raggioni" non danno luminescenza e mostrano una microfratturazione meno intensa di quella che ha interessato la calcite fibrosa delle evinosponge. Alcune piccole zone a luminescenza da giallo-arancio fino a rosso, denotano la presenza di calcite tardo-diagenetica e di dolomite, che sostituiscono selettivamente la calcite non luminescente (Jadoul, 1987).

3 Calcite spatica.

Questo tipo di cemento costituisce sempre il riempimento tardivo dei vuoti residui rimasti nelle cavità inter-intragranulari della intera piattaforma e forma anche localmente il nucleo di piccole evinosponge (Fig. 10a). I cristalli hanno generalmente forme anedrali con contatti irregolari; solo in alcune cavità più grandi si sono osservate terminazioni scalenoedriche. Le dimensioni dei cristalli spesso aumentano verso l'interno della cavità. In Catodoluminescenza (CL) questo tipo di cemento appare zonato, con più fasi luminescenti di colore giallo arancione alternate a fasi non luminescenti. Tra i vari accrescimenti sono state osservate alcune discontinuità, collegate a interruzioni e/o dissoluzioni avvenute tra le varie fasi di precipitazione. Le fasi tardive generalmente non sono interessate dalle microfratturazioni, in quanto alcune di queste calciti luminescenti hanno cementato le microfratture delle evinosponge (Jadoul, 1987). Esse sono invece attraversate dalle fratture alpine.

4 Calcite ferrifera e dolomite ankeritica.

Costituiscono le ultime fasi di cementazione delle cavità, quando esse non sono rimaste geodiche. Sostituiscono il più delle volte parzialmente i cementi spatici al nucleo di evinosponge piccole. In CL presentano zonature e luminescenza poco sviluppate, di

colore bruno per la calcite, rosso intenso per la dolomite non sono interessate da microfrazioni.

Discussione

1 Genesi delle cavità.

Lo sviluppo delle evinosponge è direttamente collegato alla presenza nella roccia incassante di cavità determinate da due tipi di porosità: a) primaria, soprattutto intergranulare; b) secondaria, causata dall'allargamento di pori preesistenti per dissoluzione e/o erosione. In analogia con le attuali biocostruzioni riteniamo che nel Calcare di Esino la porosità primaria sia legata quasi esclusivamente alla struttura di crescita dei granuli ("growth framework") e sia interparticellare (Choquette & Pray, 1970). A questa si sarebbe sovrapposta una notevole porosità secondaria, che ha rispettato la struttura originaria della roccia ("fabric selectivity"). Questi fenomeni sono indicativi dell'azione di acque sottosature in una o più fasi di carbonato di calcio, durante uno stadio precoce post-deposizionale. Questi fluidi sottosaturi potevano essere di origine diversa, sia meteorica che marina. Non ci sono elementi qualificanti e incontrovertibili in favore di una dissoluzione ad opera di sole acque dolci, a prescindere dalla presenza di alcune grandi cavità immediatamente sottostanti la superficie di emersione al tetto del Calcare di Esino. Per quanto riguarda l'acqua marina, essa può diventare aggressiva nei confronti di alcune fasi mineralogiche del carbonato di calcio di precipitazione in funzione: a) delle variazioni dello stato di saturazione rispetto all'aragonite, o alla calcite ad alto o a basso contenuto di Mg; b) delle caratteristiche microstrutturali degli stessi minerali (Walter, 1985). In ambiente marino prevale la dissoluzione di aragonite e Mg-calcite con difetti cristallini e microporosità (Frisia & Wenk, 1985).

Anche il decadimento delle parti molli degli organismi può avere contribuito alle fluttuazioni dello stato di saturazione delle acque connate. Tuttavia rimane ancora sconosciuta la funzione esercitata sulla porosità secondaria nelle litofacies ad evinosponge.

Senza volere sottovalutare quanto abbiamo sopra ricordato, riteniamo che nel Calcare di Esino la sottosaturazione dei fluidi si sia realizzata anche per apporto di acque dolci. La nostra ipotesi trova riscontro nei dati della letteratura riguardanti la dissoluzione in carbonati recenti. Secondo Bögli (1971) e Palmer & Williams (1984) infatti la zona in cui avviene il mescolamento di acque meteoriche e marine è sede di estesi fenomeni di dissoluzione. Essa costituisce nello stesso tempo un ambiente diagenetico estremamente variabile, in cui, oltre alla dissoluzione, si può avere contemporanea precipitazione di cementi.

Chiare evidenze di esposizioni subaeree si osservano nel Calcare di Esino solo in corrispondenza della sua sommità, sia nelle facies di piattaforma interna che di margine biocostruito. Queste evidenze sono rappresentate dalle cavità carsiche e dalle tasche, fessure riempite essenzialmente da sedimenti laminati, da caliches e raramente da paleosu-

li a terra rossa (Assereto et al., 1977). I caratteristici cementi vadosi sono invece rari o assenti nelle facies di margine, più diffusi in quelle di piattaforma interna con tepees. Altre testimonianze della presenza di aree emerse nel Ladinico superiore, forse di isole vulcaniche, provengono dall'abbondanza di frustoli vegetali rinvenuti nel prospiciente bacino della Formazione di Wengen. Le lenti d'acqua dolce stabilitesi al di sotto di queste isole potevano essere analoghe a quelle studiate nei carbonati delle Barbados da Steinen, Matthews & Sealy (1978) che hanno rilevato una notevole variazione delle geometrie e delle caratteristiche chimiche. Lo studio dei pollini (Visscher & Zwan, 1981) ha evidenziato per il Ladinico un clima monsonico relativamente più umido rispetto alle altre età del Trias. Questi elementi sembrano quindi costituire un'ulteriore conferma che, nel Calcare di Esino, almeno per un certo periodo (Ladinico sommitale), si è avuta un'attiva circolazione di acque dolci meteoriche.

L'interpretazione da noi proposta per la formazione delle cavità occupate dalle evinosponge e per la loro cementazione, consiste in processi diagenetici precoci, che avevano luogo in ambiente freatico, con rimescolamento di acque in vari stati di saturazione rispetto alle fasi di carbonato di calcio presenti nel sedimento. Il chimismo di tali soluzioni acquose poteva variare nello spazio e nel tempo, permettendo una estesa dissoluzione e una quasi contemporanea precipitazione di fasi più stabili di CaCO_3 .

2 Natura dei cementi originari alla luce delle attuali conoscenze.

La natura del minerale che costituiva i cementi originari è materia di dibattito. La calcite omogenea e a basso contenuto di magnesio, che noi osserviamo oggi, rappresenta infatti il risultato di vari processi diagenetici sovrapposti gli uni agli altri, non ultimo quello di diagenesi profonda, che hanno alterato le caratteristiche isotopiche (Frisia, Jadooul, Weissert in prep.). Diagenesi profonda che sconfinava anche nel metamorfismo di basso grado, come parrebbero indicare certe deformazioni nel reticolo cristallino della calcite e le osservazioni condotte da Garzanti (1985) sulle Arenarie di Val Sabbia del Carnico della Bergamasca.

Tuttavia l'argomento principale che ancora divide i petrologi del sedimentario riguarda l'ambiente di precipitazione, il quale determina di conseguenza anche la natura del cemento originario. Alcuni (Kendall, 1985) sostengono infatti che la cementazione di cavità nelle piattaforme carbonatiche avvenga quasi esclusivamente in ambiente marino freatico; altri invece (ad es. Assereto & Folk, 1980) contemplano la possibilità che cementi calcitici fibrosi siano precipitati da acque di origine meteorica. Le varie possibilità verranno qui di seguito analizzate e discusse.

Cementi aragonitici.

Se ci si basa sulle osservazioni attualistiche, si nota come cementi aragonitici che occludano completamente la porosità intergranulare, non siano comuni (Sandberg, 1983, 1985). Questo minerale poi in genere non forma croste isopache, come quelle che si os-

servano nei cementi che riempiono cavità di tipo evinosponge, ma si aggrega in sferuliti o assume un aspetto a graticcio (James & Ginsburg, 1979). In alcune cavità dell'Esino si svilupparono tuttavia sicuramente cementi aragonitici, rappresentati attualmente dai "raggioni". Questi cristalli, che ora formano emisferoidi calcitici, possiedono infatti le proprietà citate da Assereto & Folk (1980) e da Sandberg (1985) come indicative di una aragonite alterata; in particolare mostrano ancora tracce di Sr rilevabili alla microsonda. Taviani & Rabbi (1985) hanno osservato sulle isole del Mar Rosso cementi di aragonite botrioidale, che formano mammelloni molto simili alle croste delle evinosponge e che riempiono cavità di un reef pleistocenico a Coralli, esposto a condizioni subaeree. Gli autori sottolineano che i valori isotopici di questi cementi sono consistenti con quelli di cementi marini provenienti dal Belize (James et al., 1976) ($\delta^{18}O$ compresi tra +0,36 +4,54‰ PDB). Altre osservazioni rilevano che i botrioidi, composti da masse di fibre aragonitiche riunite in un ventaglio, si ritrovano frequentemente nell'atollo di Mururoa e in Mar Rosso (Aissaoui, 1985) entro cavità di origine sia primaria, che secondaria. Inoltre il Ladinico cadrebbe in uno di quei periodi che Sandberg (1983) considera come favorevoli alla precipitazione di aragonite.

L'aragonite quindi con il suo abito aciculare, avrebbe potuto costituire il cemento precursore precipitato sin-deposizionalmente da acque marine, che riempivano i pori precedentemente allargati. In seguito durante la diagenesi, l'aragonite sarebbe stata sostituita dall'attuale cemento calcitico a basso contenuto di Mg.

A questa ipotesi si possono muovere tuttavia alcune obiezioni. La prima è basata sulle analisi chimiche. Se infatti tutti i cementi fossero stati aragonitici, perchè solo i raggioni conservano tracce di Sr? A questa si aggiungono poi le osservazioni al microscopio. Secondo Mazzullo (1980) e Sandberg (1985) le aragoniti calcitizzate mostrerebbero mosaici di calcite piuttosto grossolani ed irregolari, che tagliano le strutture originali e che inglobano relitti di aragonite (Pingitore, 1976). Queste caratteristiche sono sì presenti nei raggioni, ma mancano nelle fibre calcitiche delle evinosponge. Infine anche le osservazioni sui reef recenti sono contrarie alla ipotesi di aragonite come precursore dei cementi mammellonari che costituiscono le evinosponge. Infatti nei reef attuali i cementi di Mg-calcite (HMC) sono di gran lunga i più comuni (Ginsburg et al., 1971; James et al., 1976); anche a Mururoa i cementi aragonitici fibrosi sono subordinati rispetto a quelli composti da Mg-calcite (Aissaoui & Purser, 1985; Aissaoui et al., 1986).

Cementi composti da Mg-calcite ad alto contenuto di Mg (HMC).

In questi cementi la calcite ha un alto contenuto di Mg, cioè 14 - 19 moli% (Tucker, 1981)(1). Questa fase mineralogica ha un ruolo dominante nel consolidamento dei reef attuali nella diagenesi precoce in ambiente marino freatico. Spesso forma croste concentriche, isopache, che riempiono i pori intergranulari o quelli creati dalla costruzione stessa degli organismi (MacIntire, 1977; Lighty, 1985).

1) Una calcite con almeno 4 moli % di Mg viene considerata una Mg-calcite.

Nel caso delle evinosponge potremmo avere una testimonianza indiretta di un precursore di Mg-calcite nell'abito fibroso dei cementi e nelle loro caratteristiche ottiche e strutturali. In una stessa evinospongia si possono trovare fibre con caratteri da "radial calcite" (d'ora in avanti contrassegnata RFC) e da "fascicular optic" (FOC), oppure senza caratteri precisi. Fino a qualche tempo fa la RFC veniva considerata sostitutiva di un precursore probabilmente Mg-calcitico (Kendall & Tucker, 1973); ora essa è ritenuta anche un cemento Mg-calcitico di origine primaria (Kendall, 1985) precipitato in ambiente marino. Questo tipo di calcite è molto comune nelle scogliere devoniane, dove riempie sia la cavità di tipo "stromatactis", sia le fessure verticali e orizzontali (Burchette, 1981). Tuttavia pur essendo diffusa nei carbonati del Paleozoico, la RFC non è mai stata osservata nei reef attuali. Spesso croste di RFC sono intercalate a fanghi carbonatici, analogamente a quanto si osserva nei cementi marini attuali HMC (Land & Moore, 1980); oppure possono essere troncate da micrite microlaminata, come nel Golden Spike Reef del Devoniano (e anche nelle evinosponge), a sua volta ricoperta da RFC, che potrebbe rappresentare cementi micritici sottomarini o "algal coatings" (Krebs, 1969). L'abito fibroso della RFC viene dunque attribuito a precipitazione in acque marine normali o ipersaline di cementi prevalentemente Mg-calcitici. I cementi tipo RFC e FOC, quando sostituiti da calcite a basso contenuto di Mg che ne ha tuttavia preservato l'abito fibroso, presentano tracce di Mg significative (microdolomiti), una composizione isotopica che riflette un'origine marina e sono intercalati a sedimenti interni geopetali; sono infine frequentemente confinati a pori e cavità di origine primaria.

Le evinosponge non mostrano alcuna di queste caratteristiche. L'unica altra evidenza indiretta, oltre all'abito, per una origine dei cementi in esame da calcite ad alto contenuto di Mg potrebbe essere la presenza di plaghe dolomitiche vicino alle evinosponge; tali plaghe avrebbero potuto formarsi in seguito alla liberazione di Mg durante il processo di dissoluzione-riprecipitazione del cemento carbonatico. A favore dell'ipotesi di un precursore Mg-calcitico delle croste isopache, risulta anche il confronto con la cementazione osservata nell'atollo di Mururoa. In questo atollo sono molto comuni croste isopache composte da cristalli subparalleli di Mg-calcite, che talvolta mostrano anche estinzione ondulata (Aissaoui et al., 1986). Questi cementi vengono considerati di origine marina in base alla loro composizione isotopica.

Cementi calcitici a basso contenuto di Mg (LMC).

L'ipotesi che il cemento precursore sia una calcite a basso contenuto di Mg non può essere scartata a priori, benchè solitamente questa calcite si presenti con abito spatico e non fibroso. Calciti a basso contenuto di magnesio e con caratteristiche tipo RFC potrebbero anche essere precipitate da acque marine (Kendall, 1985), soprattutto postulando un cambiamento nella distribuzione degli elementi chimici del mare (Sandberg, 1975; Renard, 1986), che sarebbe anche stato possibile soprattutto per i cementi del Paleozoico; ma questa possibilità deve ancora essere comprovata.

Calcite a basso contenuto di Mg e fibrosa è presente a Mururoa (Aissaoui et al., 1986), occasionalmente coperta da sedimenti non marini e priva di estinzione ondulata.

McKenzie & Lister (1983) suggeriscono, sulla base del contenuto isotopico, che la precipitazione dei cementi fibrosi delle grossooliti sia avvenuta in pori riempiti di acque dolci meteoriche. Assereto & Folk (1980) interpretano la "coconut meat calcite" (CMC) che riempie alcune cavità presenti nel Calcare Rosso e che ha basso contenuto di Mg, abito fibroso ed estinzione ondulata, come derivata da un precursore quale CaCO_3 monoidrato o esaidrato, attualmente rinvenuto in grotte o sulle rive dei laghi. Questi autori suggeriscono anche, come possibile precursore, la lublinita, una forma di calcite aciculare che si sviluppa nelle grotte, in acque fredde. Tale ipotesi potrebbe essere applicabile però solo ad alcuni cementi della parte alta del Calcare di Esino, caratterizzata da litofacies inter-sopratidali simili a quelle del Calcare Rosso. Non spiegherebbe tuttavia la formazione della gran parte dei cementi che riempiono le cavità originatesi in ambiente subtidale. Le calciti di grotta, inoltre, contengono numerose inclusioni fluide, che non sono state osservate nelle evinosponge. Broughton (1983) infatti, studiando in modo approfondito i cristalli di calcite che costituiscono le stalattiti, ha osservato in essi una struttura radiale, l'abito colonnare (CRC), la crescita competitiva con bordi irregolari, oltre a deformazioni nel lattice dei cristalli, che potrebbero farli somigliare a quelli delle evinosponge. Tuttavia questi particolari cristalli da lui studiati si formano solo in periodi di allagamento della grotta. Per spiegare l'origine carsica delle evinosponge, bisognerebbe però prima riuscire a capire come la soluzione possa pervadere alcune centinaia di metri di piattaforma rimanendo sempre satura rispetto alla calcite con Mg.

Ci pare quindi più probabile, alla luce di quanto discusso, la nostra interpretazione, che vede l'interazione tra lenti di acqua dolce ed acqua marina. Sandberg (1985) ha suggerito infatti che certe RFC e FOC pleistoceniche, rinvenute in Giappone, si siano potute formare in condizioni diverse da quelle marine normali, dato che sono cresciute su calciti con morfologie associate a deposizione in acque dolci. Egli ne ha tratto la conclusione che cementi RFC e FOC possano formarsi in una grande varietà di soluzioni acquose. E questa è anche la nostra ipotesi. Dissoluzione e cementazione delle evinosponge dovevano avvenire quasi contemporaneamente in un certo livello stratigrafico. Acque sottosature che potevano determinare la soluzione della aragonite e della Mg-calcite degli scheletri degli organismi, del sedimento e di originari cementi precoci, potevano diventare sovrasature facendo precipitare calciti con contenuto di Mg variabile, che venivano poi riequilibrare durante la diagenesi più tardiva.

Anche gli organismi potevano aver avuto un ruolo determinante nel processo di cementazione. Nel Calcare del Trogkofel (Permiano), ad esempio, i *Tubiphytes* e le Archeolithoporelle sono strettamente associati a cementi sindeposizionali radiali-fibrosi (reef cements, Flügel, 1981). Alghe e *Problematica* avrebbero quindi potuto agire da catalizzatori del cemento, formando un corpo rigido, resistente e poroso simile a quello di reef ad Alghe e Coralli. Interpretazioni diagenetiche che coinvolgono processi sia marini che meteorici sono state anche prospettate per spiegare la cementazione dell'atollo di Mururoa (Aissaoui & Purser, 1985; Aissaoui et al., 1986), che presenta le maggiori analogie con quella qui considerata.

Conclusioni

Da quanto esaminato possiamo concludere che per la formazione delle evinosponge abbia avuto un ruolo fondamentale la porosità primaria delle litofacies di reef, back reef e reef flat del Calcare di Esino, prospicienti a bacini aperti, con moto ondoso favorevole a un continuo ricambio di acqua marina entro gli spazi intergranulari della biocostruzione e dei sedimenti bioclastici retrostanti. I pori sarebbero stati allargati e messi talora in comunicazione, dando luogo così ad una estesa porosità secondaria, tuttavia sempre legata alla struttura del buildup ("fabric selective") per l'azione combinata di acque marine e di origine meteorica. Data la variabilità del chimismo delle soluzioni circolanti, queste potevano raggiungere vari stadi di saturazione rispetto ad una delle fasi carbonatiche (aragonite, HMC, LMC) e, quindi, potevano precipitare cementi isopachi e fibrosi nella zona freatica (Fig. 11; schemi 1a, b, c). L'azione catalizzatrice di organismi, quali *Tubiphytes* e Alghe blu e verdi, poteva aver favorito o innescato il processo di precipitazione dei cementi, poichè essi costituivano nella maggior parte dei casi il legante che rendeva rigide e resistenti le litofacies del margine (framework).

La Catodoluminescenza ha mostrato che i cementi delle evinosponge, in quanto non luminescenti e privi di zonature, appartengono alla stessa fase di cementazione delle piccole cavità intraparticellari. Questa cementazione deve essere avvenuta in tempi brevi, in prevalenza durante la diagenesi precoce, in un ambiente a circolazione aperta, ossidante, quindi in un sistema con costante apporto di fluidi e chimismo variabile. Più complessa risulta la spiegazione sulla natura del cemento che precipitava nei pori così allargati. Sicuramente si è avuta precipitazione di cementi aragonitici, rappresentati dai "raggioni", presenti soprattutto nella parte alta del Calcare di Esino; questa precipitazione deve essersi verificata nel periodo in cui le condizioni paleoambientali erano quelle di una piattaforma inter-sopratidale, e l'azione di una forte evaporazione poteva dare fluidi ipersalini.

Per quanto riguarda le croste isopache, ora composte di calcite a basso contenuto di Mg, queste potevano essere originariamente più sottili e formate di piccole fibre di HMC (calcite ad alto contenuto di Mg) (Fig. 11; schemi 1a, b, c), in analogia con quanto si osserva a Mururoa. A seguito di fluttuazioni nella lente d'acqua dolce, la composizione dei fluidi diagenetici poteva variare, modificando così la saturazione rispetto all'aragonite. La Mg-calcite veniva dissolta e precipitava una LMC (Fig. 11; schemi 2a, b). Le geometrie concentriche, e le alternanze tra croste chiare e scure, si possono spiegare nei termini di periodi di stasi in circolazione dei fluidi. Questi favorivano l'azione batterica, che si traduceva in micritizzazione dei cementi e nella loro parziale distruzione. La trasformazione delle facies del Calcare di Esino, da un sedimento poroso biocostruito, in parte già solidificato, ad una roccia costituita volumetricamente dal 50 - 70 % di cementi fibrosi calcitici, deve essere avvenuta in uno stadio diagenetico marino relativamente precoce, a scarsa profondità; molta importanza deve avere avuto anche l'influsso delle acque meteoriche. Con l'emergere della piattaforma, le evinosponge già formate veniva-

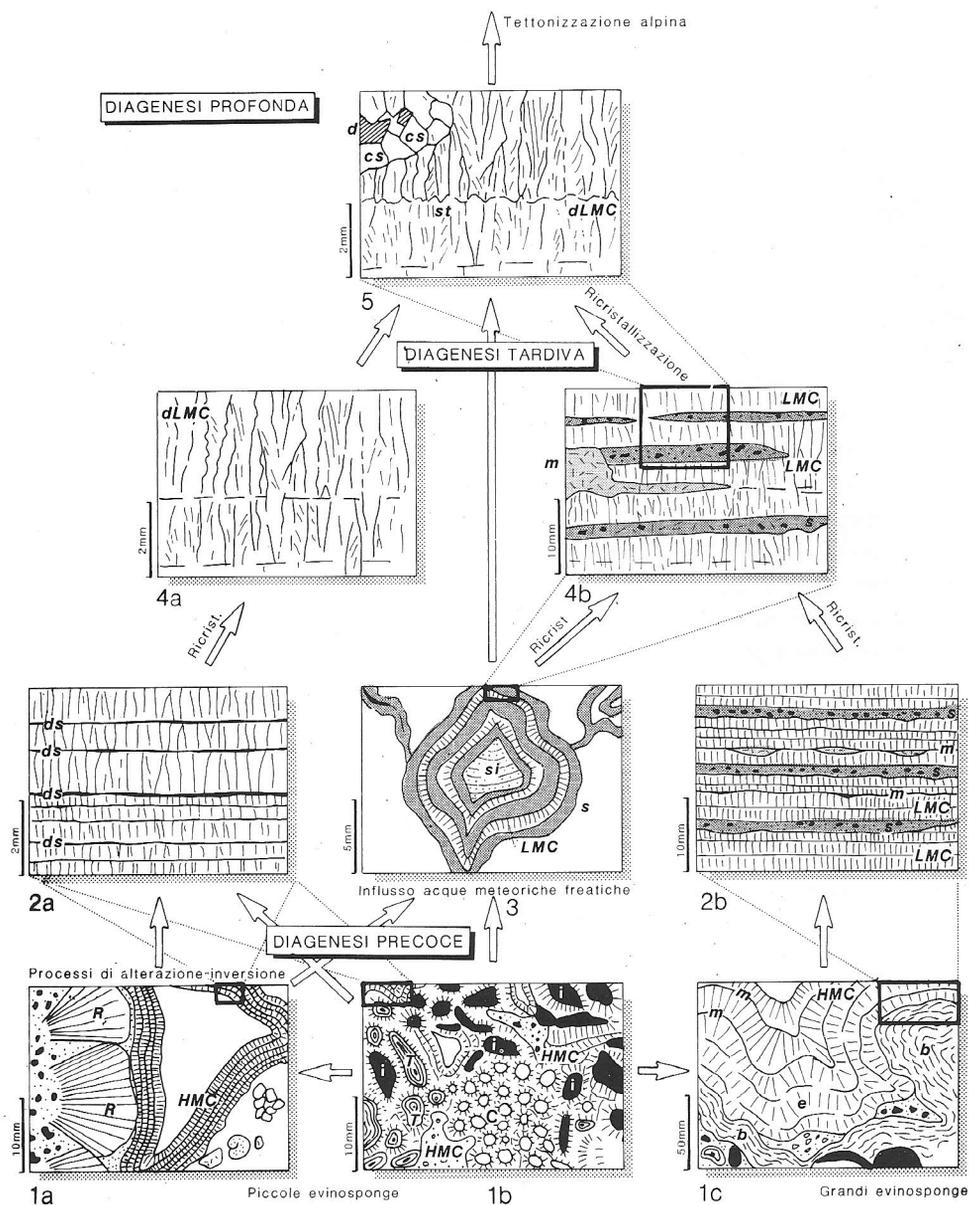


Fig. 11 - Schemi dell'evoluzione diagenetica delle evinosponge qui proposta. Per maggiori dettagli si veda il testo.

1) Processi sindeposizionali e di diagenesi precoce in ambiente freatico marino.

a) Piccola cavità in facies di back reef (packstones grossolani, localmente bindstones) con "raggioni" aragonitici (R) e croste isopache di Mg-calcite (HMC).

b) Piccole cavità intra-intergranulari in un patch reef a Coralli (C), *Tubiphytes* (T), intraclasti (i), cementate da cementi di Mg-calcite (HMC) che conferiscono rigidità al litotipo.

c) Cavità intergranulare di medie dimensioni in un bindstone, allargata da processi di erosione e/o

no localmente interessate da fenomeni carsici (Fig. 5; 11, schema 3), che in parte potrebbero anche avere mascherato alcune delle strutture del Calcare di Esino sommitale.

La complessa evoluzione diagenetica vede la trasformazione dei cementi da calcitici a basso contenuto di Mg (LMC) a «diagenetici» (dLMC), tramite omogeneizzazioni chimiche e ricristallizzazioni (Fig. 11; schemi 4a, b). Questa fase potrebbe essere di poco antecedente, oppure anche coeva, con la microfratturazione dei carbonati, che ha riaperto il sistema e consentito il passaggio di fluidi responsabili della formazione di calcite luminescente (Fig. 11; schema 5). Tali fluidi (idrotermali o di brine bacinali migrate lateralmente nella piattaforma) dovevano avere temperature elevate, come si potrebbe dedurre dalle misurazioni della temperatura nelle inclusioni fluide della fluorite (124°C) nel sovrastante Calcare Metallifero Bergamasco (Hein, 1982). Questi fenomeni di fratturazione e di deformazione anchimetamorfica del reticolo cristallino delle calciti dei cementi, potrebbero essere di età eoalpina; oppure essere legati alla diagenesi profonda a

dissoluzione. (b) Bindstone a *Spongiostromata*, oncoidi e rare Spugne calcaree. Croste di cementi di HMC (e) con intercalati veli micritici scuri (m) o lamine con fini intraclasti e/o pellets.

2) Processi di calcitizzazione legati a mescolamento di acque dolci meteoriche ed acque marine, con alterazione-inversione dei cementi marini in calcite a basso contenuto di Mg (LMC).

a) Particolare di una crosta di tipo 1a, b. Nella parte inferiore sono ancora conservate le sottili lamine concentriche con struttura fibrosa ereditata dall'originale cemento marino. Le discontinuità (ds) tra questi involucri possono essere legate a bioerosione batterica. Nella parte superiore la sostituzione da fibre lunghe forma croste più spesse di quelle originali.

b) Particolare di una crosta di tipo 1c caratterizzata da intercalazioni sottili nelle croste di lamine scure microspartitiche con fantasmi di piccoli intraclasti (s) e veli microspartitici generalmente concordanti con le croste dei cementi.

3) Fenomeni paleocarsici legati alle emersioni del Ladinico sommitale. Locale allargamento delle cavità delle evinosponge e cementazione con croste di LMC spesso composite, analoghe a quelle di 2b. Al nucleo sedimenti geopetali (si).

4) Processi di diagenesi tardiva, con modificazioni legate al variare del chimismo dei fluidi nei pori.

a) Particolare di una crosta tipo 2a con pseudofibre ben sviluppate di calcite diagenetica a basso contenuto di Mg (dLMC), che spesso obliterano gran parte della originale struttura a lamine concentriche creando croste grossolane.

b) Come 4a, ma con ancora conservate alcune lamine con fantasmi di intraclasti (s) e che presentano incipiente microspartitizzazione sia in plaghe irregolari che in involucri concentrici (m)

5) Processi di diagenesi profonda: microfrazture e stiloliti (st), omogeneizzazione isotopica, dissoluzioni e cementazioni di calcite spatica (cs). L'ultima fase di precipitazione da dolomie e/o calciti ferri-fere (d).

Proposed diagenetic evolution for the evinosponge.

1a,b,c) Syndepositional and early diagenetic processes occurred in marine phreatic environment. (R) Aragonitic "raggioni"; (C) Corals; (T) *Tubiphytes*; (i) intraclasts; (b) *Spongiostromata* bindstone; (HMC) High Mg-calcite cements.

2a, b) Replacement of metastable CaCO₃ phases by stable Low Mg-calcite (LMC) in a mixed marine-meteoritic phreatic environment. (ds) Discontinuities between evinosponge crusts, probably due to bioerosion; (s) small intraclasts.

3) Paleokarst network linked to upper ladinian emersions. si) Internal sediments.

4a, b) Late diagenetic recrystallization: (dLMC) Low Mg-calcite pseudofibres; (i) intraclasts; (m) microspartitization.

5) Burial diagenesis. (cs) CL luminescent sparry calcite; (d) late white dolomite and or calcite; (st) stylolites.

partire dal Triassico superiore e connessi alla compattazione litostatica differenziale tra le litofacies di piattaforma e quelle ad essa eteropiche di bacino. In seguito, dopo la deformazione, sarebbero precipitati gli ultimi cementi di calcite ferrifera e dolomia ankeritica, a occludere o sostituire i nuclei spatici delle evinosponge; questi processi avrebbero così diminuito moltissimo la permeabilità della roccia, chiudendo il sistema e impedendo ulteriori trasformazioni in tempi più recenti.

Ringraziamenti.

Gli autori ringraziano per la revisione del manoscritto la prof.ssa C. Rossi Ronchetti e il prof. M. Gaetani. I disegni sono di S. Antico, le foto di G. Chioldi.

BIBLIOGRAFIA

- Aissaoui D. M. (1985) - Botryoidal aragonite and its diagenesis. *Sedimentology*, v. 32, pp. 345 - 361, 9 fig., Oxford.
- Aissaoui D. M., Buigues D. & Purser B. H. (1986) - Model of Reef Diagenesis: Mururoa Atoll, French Polinesia. In Schroeder J. H. & Purser B. H. (Eds.) - Reef diagenesis, pp. 27 - 52, 12 fig., Springer-Verlag, Berlin.
- Aissaoui D. M. & Purser B. H. (1985) - Reef diagenesis: Cementation at Mururoa Atoll (French Polinesia). *Proc. Fifth Intern. Coral Reef Congr. Tahiti*, v. 3, pp. 257 - 262, Paris-Orsay.
- Assereto R. & Folk R. L. (1976) - Brick-like texture and radial rays in Triassic pisolites of Lombardy, Italy. A clue to distinguishing ancient aragonite pisolites. *Sed. Geol.*, v. 16, pp. 202 - 222, Amsterdam.
- Assereto R. & Folk R. L. (1980) - Diagenetic fabrics of aragonite, calcite and dolomite in an ancient peritidal-spelean environment: triassic Calcare Rosso, Lombardia, Italy. *Journ. Sed. Petr.*, v. 50 pp. 371 - 394, Tulsa.
- Assereto R., Jadoul F. & Omenetto P. (1977) - Stratigrafia e Metallogenesi del settore occidentale del distretto a Pb-Zn, fluorite e barite di Gorno (Alpi Bergamasche). *Riv. It. Paleont. Strat.*, v. 83, n. 3, pp. 395 - 532, 69 fig., Milano.
- Assereto R. & Kendall G. St. C. (1977) - Nature, origin and classification of peritidal tepee structures and related breccias. *Sedimentology*, v. 24, pp. 153 - 210, Oxford.
- Badiozamani K. (1973) - The Dorag dolomitization model. Application to the Middle Ordovician of Wisconsin. *Journ. Sed. Petr.*, v. 43, pp. 153 - 210, Tulsa.
- Bathurst R. G. C. (1959) - The cavernous structure of some Mississippian *Stromatactis* reef in Lancashire (England). *Journ. Geol.*, v. 67, pp. 507 - 521, Chicago.
- Bathurst R. G. H. (1982) - Genesis of stromatactis cavities between submarine crusts in palaeozoic carbonate mud buildups. *Journ. Geol. Soc. London*, v. 139, pp. 165 - 181, London.
- Biddle T. K. (1984) - Triassic sea level change and the Ladinian-Carnian stage boundary. *Nature*, v. 308, pp. 631-633, New York.
- Bögli A. (1971) - Corrosion by mixing of karst waters. *Trans. Cave Res. Grp G.B.*, v. 13, pp. 109 - 114, Roma.
- Brändner R. & Resch W. (1981) - Reef development in the Middle Triassic (Ladinian and Cordevolian) of the Northern Limestone Alps near Innsbruck, Austria. In Toomey D. F. (Ed.) - European Fossil Reef Models. *SEPM Spec. Publ.*, v. 30, pp. 203 - 231, Tulsa.

- Broughton P. L. (1983) - Lattice deformation and curvature in Stalactitic Carbonate. *Intern. Journ. Speleol.*, v. 13, pp. 19 - 30, Roma.
- Brusca C., Gaetani M., Jadoul F. & Viel G. (1982) - Paleogeografia ladino-carnica e metallogenese del Sudalpino. *Mem. Soc. Geol. It.*, v. 22 (1981), pp. 65 - 82, 5 fig., Roma.
- Burchette (1981) - European Devonian reefs: a review of current concepts and models. In Toomey D. F. (Ed.) - European fossil reef models. *SEPM Spec. Publ.*, v. 30, pp. 85 - 142, Tulsa.
- Choquette P.W. & Pray L. C. (1970) - Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *A.A.P.G. Bull.*, v. 54, n. 2, pp. 207 - 250, Boulder.
- Cosijn J. (1928) - De geologie van de Valle di Olmo al Brembo. *Leid. Geol. Med.*, v. 2, pp. 251 - 324, Leiden.
- Flügel E. (1981) - Low Permian *Tubiphytes/Archaeolithoporella* buildups in the Southern Alps (Austria and Italy). *SEPM Spec. Publ.*, v. 30, pp. 143 - 160, Tulsa.
- Frisia S. & Wenk R. H. (1985) - Replacement of Aragonite by Calcite from the S. Cassiano Formation (Italy). *Journ. Sed. Petr.*, v. 55, n. 2, pp. 159 - 170, 10 fig., Tulsa.
- Gaetani M., Fois E., Jadoul F. & Nicora A. (1981) - Nature and evolution of Middle Triassic carbonate buildups in the Dolomites (Italy). *Marine Geol.*, v. 44, pp. 25 - 57, Amsterdam.
- Gaetani M., Gianotti R., Jadoul F., Ciarapica G., Cirilli S., Lualdi A., Passeri L., Pellegrini M. & Tannoia G. (1987) - Carbonifero superiore, Permiano e Triassico dell'area lariana. *Mem. Soc. Geol. It.*, v. 32 (1986), pp. 5 - 48, 18 fig., Roma.
- Garzanti E. (1985) - Petrography and diagenesis of Upper Triassic volcanic arenites (S. Giovanni Bianco, Gorno and Val Sabbia Formations; Bergamasc Alps). *Boll. Soc. Geol. It.*, v. 104, n. 1, pp. 3 - 20, 8 fig., Roma.
- German K. (1971) - Calcite and dolomite fibrous cements (Grossoolith) in the reef rocks of the Wettersteinkalk (Ladinian, Middle Trias). Northern Limestone Alps, Bavaria and Tyrol. In Bricker O.P. - Carbonate Cements. *Johns Hopkins Univ. Stud. Geol.*, v. 19, pp. 185 - 188, Baltimore.
- Ginsburg R. N., Marszalek D. S. & Schneidermann N. (1971) - Ultrastructure of carbonate cements in a Holocene algal reef of Bermuda. *Journ. Sed. Petr.*, v. 41, pp. 472 - 482, Tulsa.
- Haq B. U., Hardenbol J. & Vail P. R. (1987) - Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic (250 millions years ago to present). *Science*, v. 235, pp. 1156 - 1167, 5 fig., Washington.
- Hein U. F. (1982) - Rapporti tra anomalie di fluoro e geochimica delle fluoriti nell'ambito delle serie carbonatiche mineralizzate a Zn-Pb-F-Ba del Triassico alpino. *Mem. Soc. Geol. It.*, v. 22, pp. 83 - 99, Roma.
- Hofsteenge G. L. von (1932) - La géologie de la Vallée du Brembo et de ses affluents entre Lenna et San Pellegrino. *Leid. Geol. Med.*, v. 4, pp. 27 - 82, 2 tav., 5 fig., 1 carta geol. al 1:25.000, Leiden.
- Jadoul F. (1987) - La diagenesi tardiva nei cementi carbonatici: evidenze dallo studio in catodoluminescenza. *Rend. Soc. Geol. It.*, v. 10, pp. 1 - 4, Roma.
- Jadoul F. & Rossi P. M. (1982) - Evoluzione paleogeografico- strutturale e vulcanismo triassico nella Lombardia centro- occidentale. In Castellarin A. & Vai G. B. (Eds.) - Guida alla Geologia del Sudalpino Centro-Orientale. *Guide Geol. Reg. S.G.I.*, pp. 143 - 155, 3 fig., Bologna.
- James N. P. & Ginsburg R. N. (1979) - The sea ward margin of Belize barrier and atoll reef. *Int. Assoc. Sed., Spec. Publ.*, n. 3, 191 pp., Miami.
- James N. P., Ginsburg R. N., Marszalek D. S. & Choquette P. W. (1976) - Facies and fabric specificity of early subsea cements in shallow Belize (British Honduras) Reefs. *Journ. Sed. Petr.*, v. 56, pp. 523 - 544, Tulsa.
- Kendall A. C. (1977) - Fascicular optic calcite: a replacement after bundled acicular carbonate ce-

- ment. *Journ. Sed. Petr.*, v. 47, pp. 1397 - 1400, Tulsa.
- Kendall A. C. (1985) - Radial fibrous calcite: a reappraisal. In Carbonate cements. *SEPM Spec. Publ.*, v. 36, pp. 59 - 78, Tulsa.
- Kendall A. C. & Tucker M. E. (1973) - Radial fibrous calcite: a replacement after acicular carbonate. *Sedimentology*, v. 20, pp. 365 - 389, Oxford.
- Krebs W. (1969) - Early void-filling cementation in Devonian fore reef limestone (Germany). *Sedimentology*, v. 12, pp. 279 - 299, Oxford.
- Land L. S. & Goreau T. F. (1970) - Submarine lithification of Jamaican reefs. *Journ. Sed. Petr.*, v. 40, pp. 457 - 462, Tulsa.
- Land L. S. & Moore C. H. (1980) - Lithification, micritization and syndepositional diagenesis in biolithites on the Jamaican island slope. *Journ. Sed. Petr.*, v. 50, pp. 367 - 370, Tulsa.
- Leuchs K. (1928) - Über geregelte Wachstumsgefuge. *Jahrb. Geol. Bundesanst.*, v. 78, pp. 1 - 52, Wien.
- Lighty R. G. (1985) - Preservation of internal reef porosity and diagenetic sealing of submerged early Holocene barrier reef. Southeast Florida shelf. In Carbonate cements, *SEPM Spec. Publ.*, v. 36, pp. 123 - 152, Tulsa.
- Macintyre I. G. (1977) - Distribution of submarine cements in modern Caribbean fringing reefs, Galeta Point, Panama. *Journ. Sed. Petr.*, v. 47, pp. 503 - 516, Tulsa.
- Mazzullo S. J. (1980) - Calcite pseudospur replacement of marine acicular aragonite, and implication for aragonite cement diagenesis. *Journ. Sed. Petr.*, v. 50, pp. 409 - 422, Tulsa.
- McKenzie J. A. & Lister G. S. (1983) - Origin of alternating calcite and dolomite void-filling cements ("Grossooliths") in Middle Triassic reefs of the Northern Limestone Alps near Innsbruck, Austria. *4th I.A.S. Regional Meet. Abstr., Split, Jugoslavia*, pp. 108 - 110, Split.
- Palmer R. & Williams D. (1984) - Cave development under Andros Island, Bahamas. *Cave Science*, v. 11, pp. 50 - 52, London.
- Pingitore N. E. (1976) - Vadose and phreatic diagenesis processes, products and their recognition in corals. *Journ. Sed. Petr.*, v. 46, pp. 985 - 1006, Tulsa.
- Renard M. (1986) - Chimisme de l'océan, phénomènes géodynamiques internes et évolution de la biosphère. Application à la crise barrémienne: "La naissance de l'océan moderne". *BCREDP Elf-Aquitaine*, v. 10, n. 2, pp. 523 - 606, Pau.
- Sandberg P. (1975) - New interpretation of Great Salt Lake ooids and of ancient non-skeletal carbonate mineralogy. *Sedimentology*, v. 22, pp. 673 - 702, Oxford.
- Sandberg P. (1983) - An oscillating trend in Phanerozoic non-skeletal carbonate mineralogy. *Nature*, v. 305, pp. 19 - 22, Washington.
- Sandberg P. (1985) - Aragonite cements and their occurrence in ancient limestones. In Carbonate Cements. *SEPM Spec. Publ.*, v. 36, pp. 33 - 58, Tulsa.
- Steinen R. P., Matthews R. K. & Sealy H. A. (1978) - Temporal variation in geometry and chemistry of the freshwater phreatic lens: the coastal carbonate aquifer of Christ Church, Barbados, West Indies. *Journ. Sed. Petr.*, v. 48, pp. 733 - 742, Tulsa.
- Stoppani A. (1858) - Les pétrifications d'Esino ou description des fossiles appartenants au dépôt supérieur des environs d'Esino en Lombardie. *Paléont. Lombarde*, s. 1, 360 pp., Milano.
- Taviani M. & Rabbi E. (1985) - Marine botryoidal aragonite in Pleistocene reef limestones of the Red Sea offshore islands (Northern Brother and Rocky Island). *Min. Petrogr. Acta*, v. 28, pp. 49 - 58, Bologna.
- Tucker M. E. (1981) - Sedimentary Petrology, an introduction. V. di 252 pp., Blackwell, New York.
- Visscher H. & Van Der Zwan (1981) - Palynology of the Circum Mediterranean Triassic: phyto-

geographycal and palaeoclimatological implications. *Geol. Rund.*, v. 70, pp. 625 - 634, Stuttgart.

Walter L. M. (1985) - Relative reactivity of skeletal carbonates during dissolution: implication for diagenesis. In Carbonate Cements, *SEPM Spec. Publ.*, v. 36, pp. 3 - 16, 6 fig., Tulsa.

Wilson J. L. (1975) - Carbonate facies in Geologic History. V. di 471 pp., 30 tav., 183 fig., Springer-Verlag, Berlin.