

# SPELEOGENESI

## 1. DOVE SI FORMANO LE GROTTES

Prima di entrare nel vivo dell'argomento (le grotte), descriviamo brevemente l'ambiente entro cui esse si sviluppano, e cioè il carso.

In origine questo termine indicava una regione particolare situata a nord della Slovenia: zona in cui i fenomeni legati alla circolazione sotterranea delle acque nel calcare sono estremamente sviluppati. La parola è stata quindi scelta come nome comune per indicare questo genere di paesaggio su tutta la Terra.

Il carso possiede due caratteristiche essenziali:

- 1) numerose depressioni chiuse, di tutte le dimensioni;
- 2) pochi corsi d'acqua in superficie, nonostante sia una zona piovosa.

Le acque scorrono infatti sotto terra, attraverso condotti formatisi nelle rocce che presentano le proprietà seguenti:

- devono essere solubili, perché l'acqua passando possa allargare fratture preesistenti per dissoluzione;
- devono essere sufficientemente pure, perché i residui insolubili non vadano a riempire i condotti formatisi;
- devono essere abbastanza solide, da impedire ai vacui che si sono aperti di richiudersi sotto il peso della roccia sovrastante.

Queste tre condizioni si ritrovano nelle rocce carbonatiche compatte: calcari, dolomie e marmi. Ci sono altri materiali che possiedono le stesse caratteristiche, ma solo parzialmente: il ghiaccio, il gesso, il salgemma. Noi parleremo soprattutto delle prime, perché è in esse che il carsismo raggiunge la sua massima espressione.

## 2. FORME PARTICOLARI DEL PAESAGGIO CARSICO

La principale caratteristica della regione carsica è la presenza di depressioni chiuse, che assorbono tutte le acque piovane. Queste depressioni sono comunemente dette *doline* (Fig. 1).

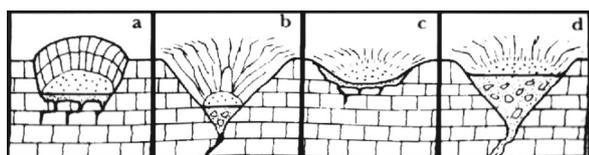
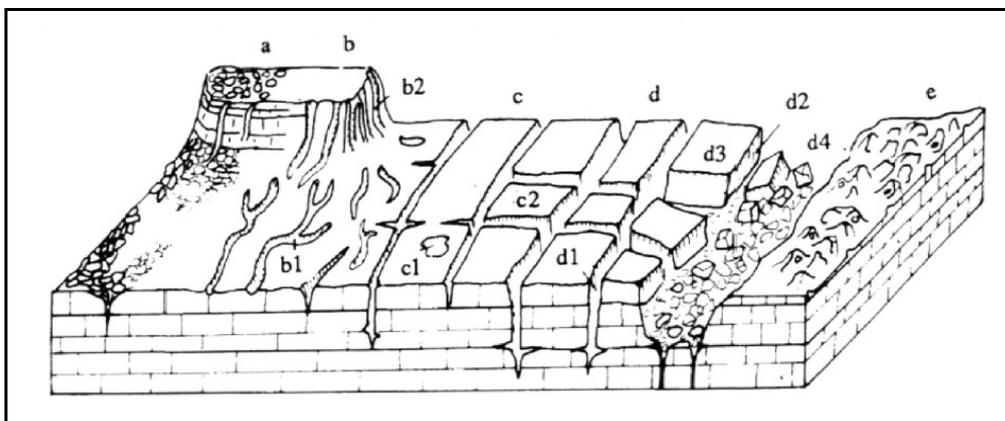
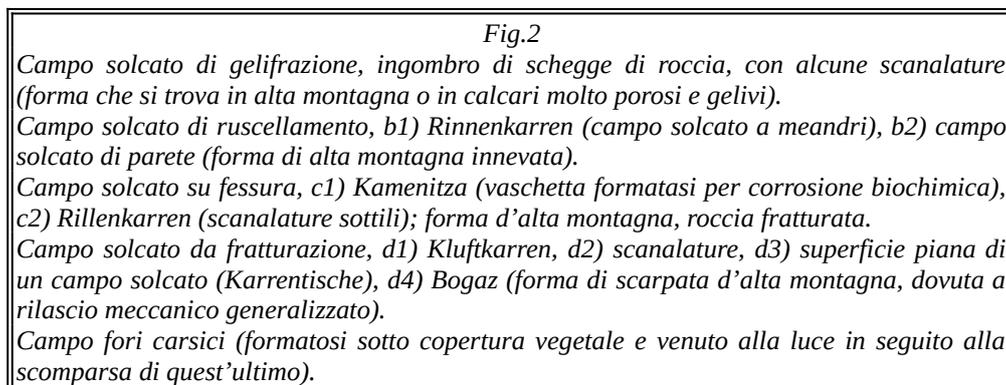


Fig.1  
a. dolina a tazza  
b. dolina a imbuto  
c. dolina a vaschetta  
d. dolina a imbuto colmato che prende la forma di scodella

La caratteristica idrologica principale delle aree carsiche è l'assenza di corsi d'acqua in superficie. La maggior parte dei flussi visibili ha origine fuori della zona carsica. Questi corsi d'acqua scompaiono non appena arrivano sugli affioramenti calcarei, all'interno di inghiottitoi o di grotte

assorbenti. La maggior parte di queste acque esce di nuovo in superficie alla base dei massicci calcarei, quando incontrano strati di roccia impermeabile, attraverso grandiose risorgenze.

Altre formazioni particolari delle aree carsiche sono gli *orridi* o *forre*, nonché i *campi solcati* (Fig. 2).



Caratterizzano il paesaggio carsico infine gli *abissi* ed i *pozzi a neve*. Gli abissi sono pozzi verticali, spesso cilindrici, formatisi per:

- sprofondamento di un vacuo carsico sottostante;
- corrosione diretta a livello di un inghiottitoio;
- erosione a livello della zona di oscillazione della falda;
- affondamento progressivo dei nevai;
- dissoluzione accentuata in fondo a una dolina.

### 3. LE CAVITÀ CARSIICHE: FORMAZIONE E STUDIO

Abbiamo già detto che la maggior parte delle grotte si sviluppa all'interno di rocce carbonatiche, la cui origine è generalmente marina. Bisogna ricordare che all'inizio esse contengono soltanto dei vacui di piccolissime dimensioni; vacui che si riducono ancora di più durante la fase di emersione. Le grandi cavità che potranno in seguito apparire saranno dunque una conseguenza dell'erosione.

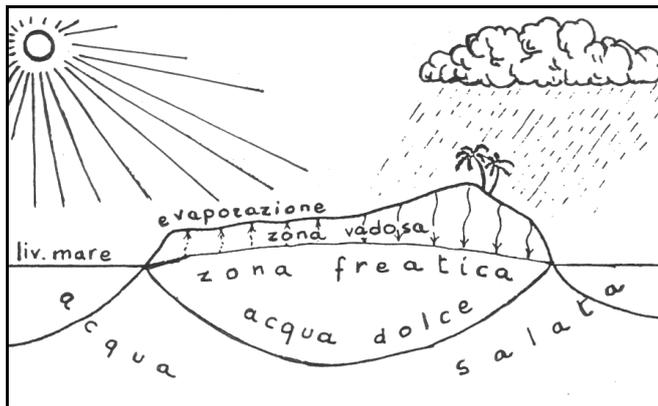
Analizziamo ora le fasi del processo di formazione delle cavità carsiche. Affinché possa verificarsi il fenomeno della carsificazione, sono fondamentali le tre seguenti condizioni:

1. che la roccia sia fratturata (per permettere il passaggio dell'acqua);

2. che esista un rilievo (e di conseguenza delle differenze di livello sufficienti a mettere l'acqua in movimento);
3. che su questa roccia scorra acqua ricca di anidride carbonica (capace di erodere chimicamente la roccia con una certa efficacia).

Le ultime due condizioni non si trovano in ambiente marino, perciò la carsificazione è un processo tipico dell'ambiente continentale.

Il fenomeno carsico ha inizio dunque dal momento in cui la roccia carbonatica emerge dal mare e viene sottoposta all'azione degli agenti atmosferici. Dopo l'emersione infatti, a causa delle precipitazioni meteoriche, all'interno della massa rocciosa si forma una zona di acqua dolce, che schematicamente assume la forma di una lente (Fig. 3).



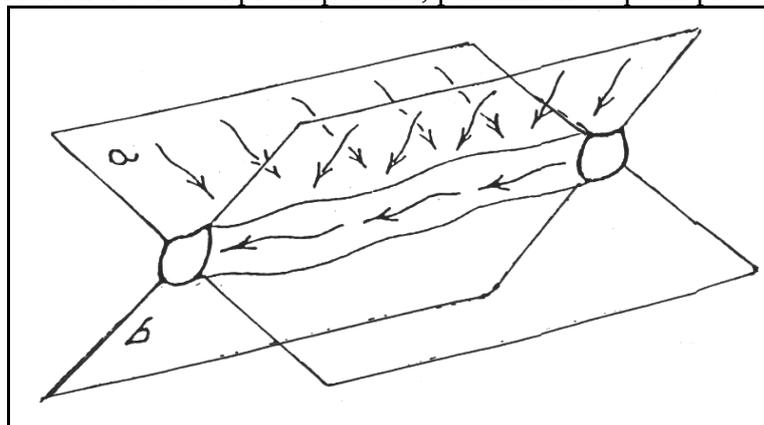
E' questa la zona freatica, in cui l'acqua occupa tutti gli spazi vuoti all'interno della roccia. In questa zona, lo scorrimento dell'acqua avviene lungo i giunti di strato e le fratture che interessano la roccia. Se due disturbi tettonici di questo tipo si incrociano, la linea di intersezione è il luogo lungo il quale le acque si mescolano e danno origine alla dissoluzione per miscelazione. Può così iniziare a svilupparsi una cavità dalla forma di tubo: i condotti freatici, lunghe gallerie suborizzontali,

di sezione pressoché circolare, si formano in queste condizioni.

Dove due o più condotti freatici si uniscono, si origina una cavità. Dove due fratture verticali si incontrano, potrà svilupparsi una cavità verticale a sezione più o meno circolare: il pozzo.

Nei condotti di una certa dimensione, quando l'acqua raggiunge una certa velocità, inizia il "flusso turbolento": l'acqua può dare origine a vortici e mulinelli, per cui alla dissoluzione per miscelazione si aggiunge l'effetto meccanico della turbolenza, accresciuta dal fatto che l'acqua scorrendo trasporta frammenti di roccia insolubili.

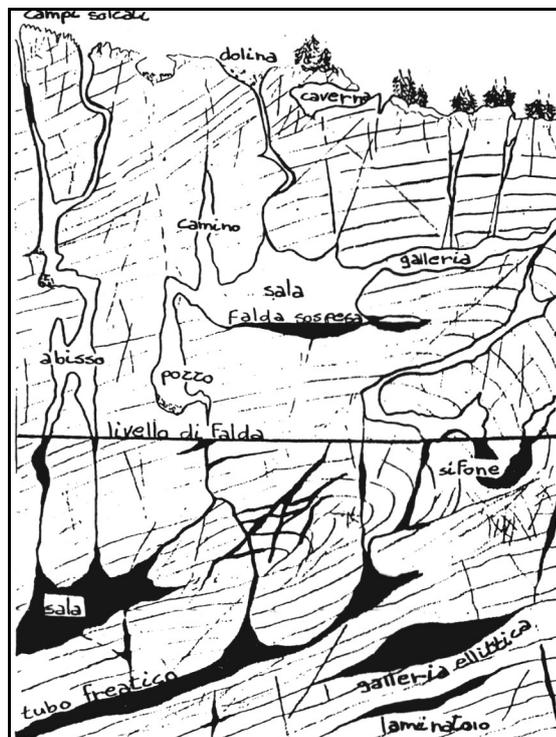
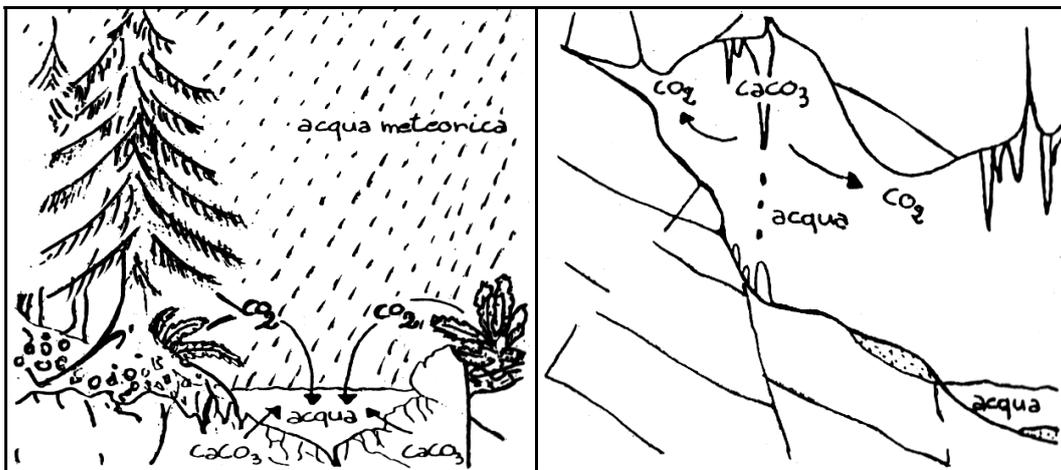
Nel settore superiore, o zona vadosa, l'acqua durante le precipitazioni, comincia a circolare attraverso il reticolo di micro-fratture formatesi per deformazione e sollevamento dei sedimenti marini e le allarga per dissoluzione. All'inizio di questo processo molte fratture hanno più o meno la stessa dimensione, ma a poco a poco si ha una vera e propria selezione naturale di quelle più grandi: l'erosione si concentrerà nei condotti più importanti, penalizzando quelli più stretti (Fig. 4).



Abbiamo parlato di dissoluzione, vediamo le singole fasi:

- l'acqua meteorica si arricchisce di  $\text{CO}_2$  prodotta dalla vegetazione e dall'attività umana ed animale;
- la soluzione di  $\text{CO}_2$ , venendo a contatto col calcare ( $\text{CaCO}_3$ ) delle rocce carbonatiche, forma bicarbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3)_2$ , che è molto più solubile del calcare.

La soluzione acqua-carbonato di calcio-anidride carbonica raggiunge però un punto di saturazione e quindi di equilibrio, per cui il fenomeno della dissoluzione cessa. A questo punto, quando l'acqua scorrendo all'interno delle fratture incontra dei vuoti, rilascia  $\text{CO}_2$  nell'aria e deposita  $\text{CaCO}_3$ , dando così inizio al fenomeno del concrezionamento, dal quale prenderanno vita stalattiti, stalagmiti, vele e quant'altro (Figg. 5, 6, 7).



## 4. LA GENESI DELLE CONCREZIONI

Per concrezione si intende una roccia depositata da acque sovrassature che normalmente ha, più o meno evidenti al suo interno, una serie di bande subparallele le une alle altre, che rappresentano i successivi momenti di accrescimento della concrezione stessa.

In base al criterio genetico, le concrezioni possono essere suddivise in quattro grandi classi, che a loro volta, poi, possono essere suddivise in sottogruppi.

Le classi sono:

- concrezioni dovute al gocciolamento dell'acqua;
- concrezioni dovute allo scorrimento dell'acqua;
- concrezioni dovute a fenomeni di capillarità;
- concrezioni dovute a depositi subacquei.

Al primo gruppo appartengono le concrezioni più comuni e più numerose, che vengono quindi suddivise in due sottogruppi:

1A) pendenti: stalattiti, tubolari, cortine;

1B) dovute alla caduta dell'acqua: stalagmiti, concrezioni di splash.

Nel secondo troviamo le colate, i crostoni e le barriere delle vaschette.

Nel terzo vi sono innanzitutto le eccentriche e quindi le «tavolozze» o «dischi» e le foglie delle stalagmiti a palma.

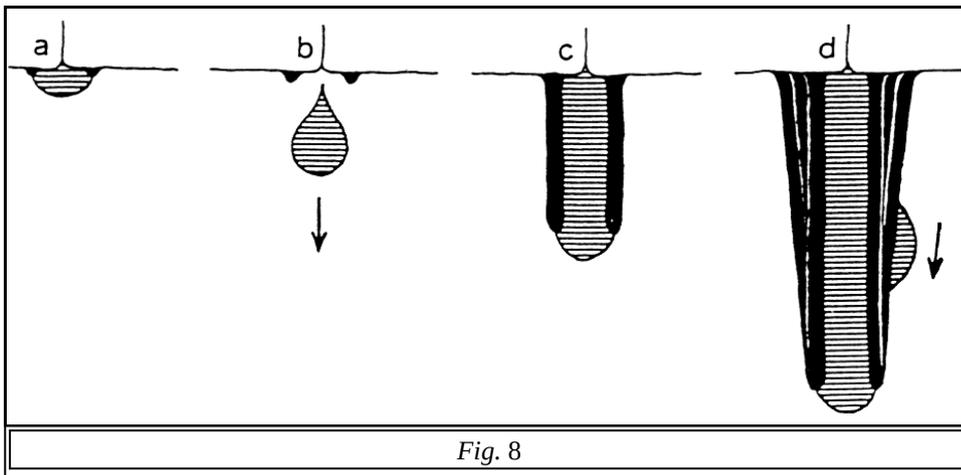
Nel quarto troviamo le pisoliti, le concrezioni a nuvola o gluteiformi.

### 4.1 *Le stalattiti e le tubolari*

Si tratta, nel complesso, certamente delle concrezioni più comuni in grotta e la loro caratteristica è quella di possedere un canalicolo centrale di alimentazione. Il meccanismo genetico, che porta alla formazione delle stalattiti e delle tubolari, è praticamente lo stesso e la differenza tra questi due tipi di concrezioni è quindi esclusivamente morfologica.

L'origine di queste concrezioni è dovuta all'acqua che, emergendo da fratture o canalicoli nel soffitto di una cavità, vi rimane appesa sotto forma di goccia per alcuni istanti prima che la goccia stessa si stacchi e cada. In questo periodo di tempo, a causa dello squilibrio nella pressione della CO<sub>2</sub> tra la goccia e l'atmosfera di grotta, si ha diffusione di anidride carbonica dalla goccia stessa, con conseguente sovrassaturazione e quindi deposizione di carbonato di calcio che, a causa della tensione superficiale, si dispone ad anello lungo i bordi della goccia stessa.

Un susseguirsi di gocce e quindi di anelli di concrezione porta alla formazione di una tubolare (*Fig.8*). Qualora la velocità di distacco della goccia sia molto elevata, non si ha il tempo sufficiente per la deposizione dell'anello di concrezione e pertanto, non si può instaurare il fenomeno di formazione di tubolari o stalattiti.



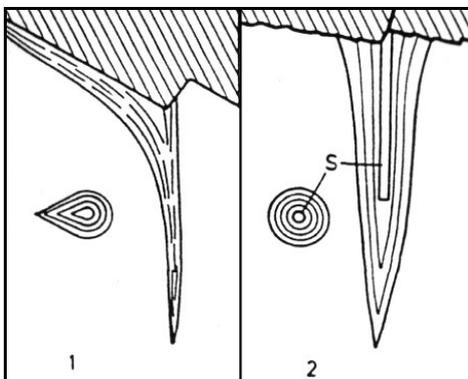
Qualora la velocità di distacco sia bassa, allora una piccola quantità di materiale viene depositata anche all'interno dell'anello fino al bordo del canalicolo di alimentazione. In questo caso si formano tubolari col foro centrale più piccolo,

ma di dimensioni e forma esterna analoga a quelle «normali».

Se la velocità di distacco cala ancora, si può giungere alla completa oblitterazione del meato di alimentazione con conseguente stop nell'accrescimento apicale della tubolare, qualora non vi siano contemporaneamente apporti laterali o dovuti a capillarità.

Gli apporti dovuti alla porosità delle pareti della tubolare o quelli laterali (questi ultimi spesso sono addirittura più importanti di quelli dovuti al meato centrale) sono responsabili dell'ingrossamento delle pareti delle tubolari che, in questo modo, si trasformano gradualmente in stalattiti dall'aspetto più o meno conico.

#### 4.2 Cortine o vele



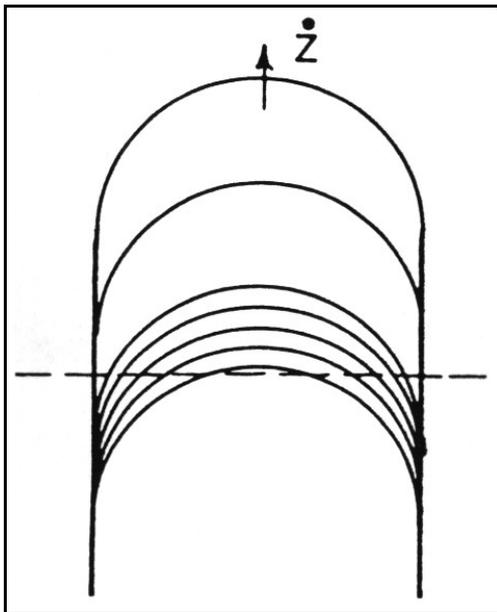
Le cortine o vele si originano quando una goccia d'acqua non si stacca direttamente dal posto ove si è formata, ma scorre per un certo tempo sulla volta della cavità. Lo spessore di una cortina è teoricamente determinato, analogamente a quanto avviene per le tubolari, dal diametro della goccia d'acqua che scorre sopra di lei. Successivi allargamenti possono avvenire per apporti laterali (Fig.9).

Fig. 9  
1) cortina;  
2) stalattite «normale».

Un caso limite di vela è dato da non infrequenti stalattiti prive di foro centrale, che in effetti si sono originate come vele pochissimo allungate e su cui poi si sono avuti notevoli apporti laterali.

#### 4.3 Stalagmiti

Le stalagmiti si originano perché le gocce, che si staccano dalla volta della grotta, possono non aver avuto il tempo di depositare tutto il carbonato di calcio sotto forma di stalattiti, tubolari o vele. Pertanto nel punto di caduta di gocce possono formarsi delle stalagmiti.



*Fig. 10*  
*Stadi successivi di sviluppo di una stalagmite. La linea tratteggiata indica una sezione trasversale, che mostrerebbe gli anelli concentrici.*

Poiché dopo l'impatto la goccia si allarga radialmente in maniera simmetrica, qualora il pavimento sia perfettamente orizzontale, il suo potere concrezionante decrescerà in maniera radiale mano a mano che ci si allontana dal punto di caduta. Pertanto la deposizione di  $\text{CaCO}_3$  sarà massima nel punto di impatto e calerà in maniera simmetrica discostandosi da questo. In linea teorica, dunque, la forma risultante dal deposito di carbonato di calcio su una superficie piatta ad opera di una goccia che cade avrà la forma leggermente a cupola.

La sezione orizzontale di una stalagmite, che abbia raggiunto il diametro di equilibrio, ci mostra come questa abbia una struttura concentrica con gli anelli centrali più spaziosi di quelli periferici, che divengono sempre più fitti. Questo è dovuto appunto al fatto che le varie cupole che formano la stalagmite si incurvano sempre di più (*Fig.10*).

#### **4.4 Concrezioni di splash (o da spruzzo)**

Queste concrezioni debbono la loro origine, come chiarisce bene il nome, alla caduta violenta d'acqua, che rimbalzando si deposita sulle pareti dei pozzi presso il loro fondo.

Le concrezioni di splash hanno una caratteristica forma rotonda globulare esterna, possono avere dimensioni molto differenti: dai pochi millimetri a vari centimetri. In genere le concrezioni più grosse si trovano più vicino alla base dei pozzi, mentre mano a mano che ci si alza tendono a diminuire di volume e di numero.

Il punto di partenza è una asperità della parete rocciosa, da cui si è avuto l'inizio del concrezionamento. Se l'origine delle acque di alimentazione è indubbiamente dovuta a fenomeni di splash, con ogni probabilità l'evoluzione più o meno grande di queste forme dipende anche in larga misura da fenomeni di capillarità e a fenomeni di evaporazione che possono aumentare la quantità del concrezionamento.

#### **4.5 Le barriere delle vasche**

Le colate e i crostoni sono concrezioni comunissime in grotta e devono la loro origine al flusso, spesso laminare, di acqua concrezionante.

Le uniche concrezioni di flusso, che possono aver un certo interesse dal punto di vista genetico, sono le barriere delle vasche. Queste formazioni sono delle specie di dighe che interrompono il flusso dell'acqua e crescono approssimativamente a angolo retto rispetto alla direzione del flusso. Spesso si trovano a gruppi equispaziati, che costituiscono la parte iniziale di una colata alabastrina.

Possono avere dimensioni verticali da pochi millimetri a oltre 5-6 metri, mentre lo spessore raramente supera i 10 centimetri. Una sezione verticale di una barriera mostra come la parte interna cresca praticamente verticale o al massimo leggermente inclinata controcorrente, mentre quella esterna sia ricurva maggiormente nel senso della corrente, fino a sfumare, a volte, in normali crostoni.

Sono le condizioni dinamiche dell'acqua, che passa da una condizione di equilibrio all'interno della vasca, ad una differente al di là dello sbarramento, che facilitano la perdita della CO<sub>2</sub> e quindi permettono la sovrassaturazione necessaria alla formazione e allo sviluppo delle barriere.

L'aumento di velocità di flusso sopra le barriere causa, come conseguenza, un calo della pressione interna del liquido proporzionale all'aumento della velocità. Se questo aumento è notevole, come in alcuni casi si verifica, allora anche la diminuzione di pressione può raggiungere valori tali da innescare, per degassazione, il processo di deposizione del carbonato di calcio.

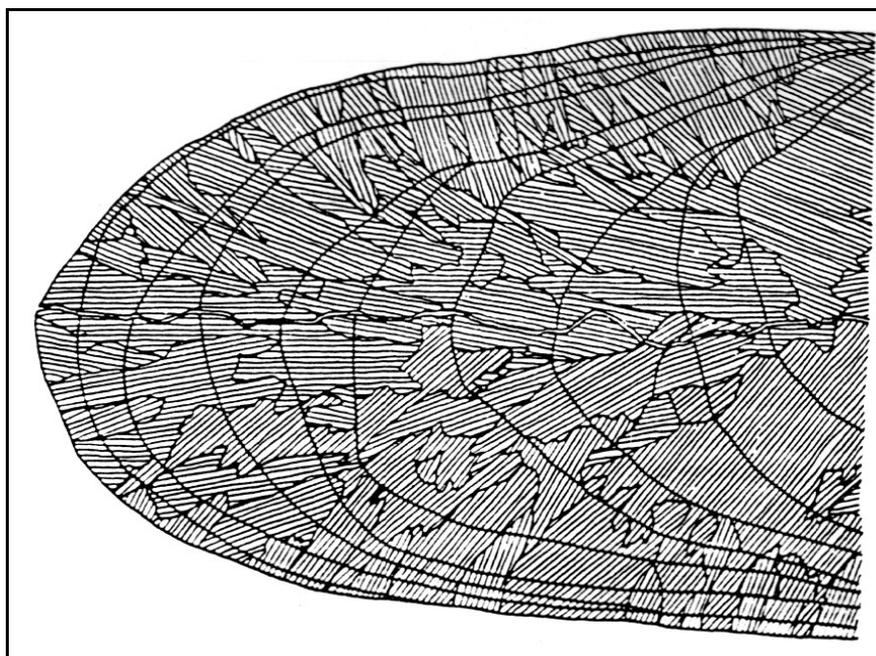
La dimensione delle barriere, quindi, sembra dipendere dalla quantità del flusso d'acqua che tracima dalle vasche: se il flusso è alto si ottengono barriere alte, se basso viceversa.

#### **4.6 I dischi**

Tra le concrezioni che debbono la loro genesi ai fenomeni di capillarità, se si eccettuano le eccentriche, le più frequenti in grotta sono quelle a disco. Si tratta di concrezioni piatte, di forma pressoché circolare, che raggiungono il diametro di 1 metro ed oltre, mentre il loro spessore raramente oltrepassa i 2-3 centimetri.

Risultano esser attaccati alla parete per un tratto del bordo e possono avere una inclinazione qualsiasi.

Spesso dalla parte inferiore dei dischi si dipartono frange di stalattiti o meglio di vele, a volte stalattitiformi, su quella superiore si possono osservare invece piccole eccentriche allineate lungo microfratture del disco stesso. I dischi sono composti da due piatti paralleli, ognuno approssimativamente spesso un centimetro, separati tra loro da una frattura centrale (Fig.11).



*Fig. 11*  
La linea suborizzontale al centro è la frattura centrale; le linee curve circa parallele alla superficie sono gli strati di accrescimento.

Sembra oramai assodato che l'origine dei dischi sia dovuta alla capillarità. L'acqua spinta per pressione idrostatica lungo una piccola frattura o un giunto di strato, quando arriva alla superficie libera all'interno di una grotta, vi deposita un poco di carbonato di calcio, dando così inizio alla formazione di un disco.

La pressione idrostatica è quella che impedisce l'occlusione della frattura di alimentazione e che spinge l'acqua quindi nella frattura centrale del disco, che è sempre di dimensioni capillari e altro non è quindi che la prosecuzione della frattura o del giunto di strato originario.

#### ***4.7 Le pisoliti***

Le più note e comuni concrezioni subacquee sono certo le Perle di Grotta o Pisoliti, anche se non sempre si originano in condizioni di completo sommergimento.

Dimensionalmente si suole suddividere le perle di grotta in ooliti, con diametri inferiori a 2 mm e pisoliti, con diametri superiori a questo limite. Chiaramente questa suddivisione è solamente dimensionale, non avendo nessun riscontro né genetico né morfologico.

In grotta è molto più comune trovare delle pisoliti grandi che delle ooliti piccolissime. Questo fatto si spiega poiché nelle vaschette di grotta esiste sempre un certo grado di turbolenza, che normalmente impedisce ai nuclei di deposizione più piccoli di stazionare all'interno della vaschetta stessa per un tempo sufficiente a venir concrezionati e, qualora anche questo accadesse, le pisoliti più piccole verrebbero, a loro volta, portate via. In altre parole il limite inferiore per le dimensioni delle pisoliti di una vaschetta è determinato dall'energia cinetica (turbolenza) dell'acqua nella vaschetta.

È l'energia cinetica che, causando una certa vibrazione delle pisoliti, impedisce che si saldino al pavimento.

Poiché una data turbolenza può permettere solo la vibrazione di pisoliti, non superiori ad una data massa, il diametro massimo teoricamente possibile sarà definito da questa energia.

In conclusione l'evoluzione delle pisoliti in una data vaschetta dipende da un unico fattore generale: l'energia cinetica dell'acqua. A proposito di questa energia, bisogna chiarire che essa va intesa non come energia media, ma «di punta», cioè la massima energia che può avere l'acqua della vaschetta nell'arco dell'anno. Infatti è sufficiente una sola volta sia per asportare i nuclei e le pisoliti più piccole, sia anche per far vibrare le pisoliti più grandi in modo che non si saldino al pavimento.

#### ***4.8 Le concrezioni gluteiformi***

Il concrezionamento completamente subacqueo è un fenomeno non molto comune dato che è raro che sott'acqua si creino le condizioni di sovrassaturazione tali da portare alla formazione di concrezioni e non di cristallizzazioni, che sono in tale ambiente assai più frequenti. Bisogna infatti che vi sia un sufficiente grado di sovrassaturazione perché si formino le concrezioni.

Quando si creano le condizioni idonee al concrezionamento subacqueo la forma di quest'ultimo è assolutamente caratteristica ed inconfondibile. Esso è costituito da grandi globi che si incastrano l'uno con l'altro e che tappezzano completamente sia le pareti che il soffitto che, a volte, anche il

pavimento della cavità; per il loro aspetto hanno preso di volta in volta il nome di nuvole di grotta o concrezioni gluteiformi.

La superficie di ogni singolo globo non è liscia ma rugosa e spesso è costituita da globuli più piccoli appena rilevati.

Strutturalmente le concrezioni gluteiformi somigliano moltissimo alle concrezioni da splash anche se si differenziano da queste innanzitutto perché coprono completamente tutto il vano della grotta e poi per la loro dimensione, molto più grande (fino a oltre un metro di raggio) e infine perché raramente sono isolate le une dalle altre, ma si presentano sempre come un groviglio di compenetrazione.

#### **4.9 Le eccentriche**

«Un'eccentrica è una concrezione di calcite, situata indifferentemente sulla volta, sulle pareti, sul suolo o anche su una concrezione precedente e che si sviluppa in ogni senso nell'aria di una grotta, senza essere apparentemente influenzata dalla gravità. È generalmente monocristallina. La sua lunghezza, di ordine da centimetrico a metrico, è abitualmente notevole in rapporto alla sua sezione, di ordine da millimetrico a centimetrico». (Geze).

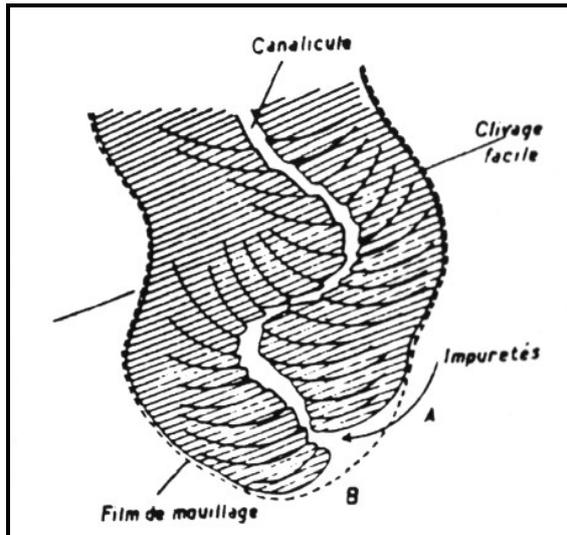
Per potersi sviluppare le eccentriche necessitano di un ambiente favorevole piuttosto particolare: in primo luogo le eccentriche necessitano di un supporto poroso con canalicoli molto fini, che generalmente è un sottile strato di calcite porosa che ricopre roccia o riempimenti argillosi e ciottolosi. Sono stati segnalati rarissimi casi in cui le eccentriche originano direttamente dalla roccia, che in questo caso deve essere porosa e con fratture minute piene di argilla; il canalicolo risulta essere il prolungamento dei capillari della roccia.

In secondo luogo necessitano di ambienti isolati, o nicchie o zone in cui l'aria sia immobile, ossia non vi devono essere correnti d'aria. In questi ambienti l'ampiezza delle variazioni di temperatura è inferiore a 1° C; sono presenti solo deboli correnti di convezione; vi è equilibrio tra condensazione ed evaporazione sulla superficie delle eccentriche. Se tali condizioni non sono rispettate si formano solo concrezioni normali.

Il fattore principale nella formazione delle eccentriche è però la portata dell'acqua di alimentazione. Se la portata è notevole si ha gocciolamento continuo dalla roccia e si forma una stalattite normale, se la portata diminuisce si forma una tubolare con un canale di diametro compreso tra 2 e 6 mm; se la portata diminuisce ancora il canale della tubolare diviene sinuoso con un diametro di 1 ÷ 2 mm, ma la crescita è ancora geotropa (ossia rivolta verso il basso) fintanto che viene mantenuto il gocciolamento all'estremità della tubolare. Quando la portata è insufficiente (frazioni di cm<sup>3</sup>/giorno), cessa il gocciolamento ed anche la crescita geotropa: la concrezione diviene eccentrica; l'acqua dall'orifizio del canale diffonde per capillarità nello strato di acqua che bagna l'eccentrica e può essere evacuata solo per evaporazione.

Attualmente si ritiene che il meccanismo che provoca la deviazione sia diverso a seconda che le eccentriche siano mono o policristalline.

Per quanto concerne le eccentriche monocristalline, le sinuosità del canale sono dovute al fatto che la quantità di calcite depositata a livello dell'orifizio del canale non è uniformemente distribuita intorno all'asse del canale stesso (*Fig.12*).



*Fig. 12*  
*Schema della parte terminale di un'eccentrica: il canale si incurva verso "a" se il deposito di calcite è più spesso in "b". In "a" la fissazione di molecole di impurezze, inibitrici della crescita, ostacolano la deposizione di carbonato di calcio.*

Tale ineguaglianza nel deposito di calcite dipende da molecole di impurezze adsorbite a caso sulle labbra dell'apertura del canale. Ciò si può produrre solamente se la portata è bassa e non dà gocciolamento (se c'è gocciolamento le impurezze vengono asportate).

Il film d'acqua esterno è molto sensibile alle impurezze (si rompe se c'è un'impurezza anche minima) e all'evaporazione. Se il film si stende facilmente, la calcite si depone in areole, intorno al canale, relativamente grandi e il diametro dell'eccentrica sarà largo con canale poco sinuoso. Se la superficie è mal bagnata, le areole sono piccole, l'eccentrica è filiforme e il canalicolo molto sinuoso.