



PEROLAS DAS CAVERNAS

ESPELEOTEMAS

SECRETARIA DA AGRICULTURA
COORDENADORIA DA PESQUISA DE RECURSOS NATURAIS
INSTITUTO GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO

BOLETIM 53

ESPELEOTEMAS
E
PÉROLAS DAS CAVERNAS

ENG. JOSE EPITACIO PASSOS GUIMARÃES

FOTOS DE: PEDRO P. COMÉRIO
SAULO ZUCHELLO

SÃO PAULO
1974

FICHA BIBLIOGRÁFICA

Guimarães José Epitácio Passos, 1919 -
III Espeleotemas e pérolas das cavernas.
III São Paulo, 1974.

p. ilus. col. III (Instituto Geográfico
e Geológico. Boletim 53)

Bibliografia.

Espeleotemas

Grutas e cavernas – São Paulo

CDD 551.44

Capa. Gruta do Chapéu, município de
Iporanga, E.S.P. (praça-3.600m³).

RESUMO

Dada a raridade, o processo genético dos pisólitos em grutas calcárias, ainda não é muito conhecido e poucos são os estudos sobre essas curiosas formações. O encontro de belos exemplares, vários com esfericidade e ritimicidade perfeitas das camadas, em algumas cavernas do município de Iporanga, no Estado de São Paulo, permitem adicionar algumas novas informações àquelas citadas na literatura geológica. As "pérolas das cavernas" estão aí relacionadas com receptáculos em forma de pequenas "bacias" ou "berços", com soluções límpidas concentradas de bicarbonato de cálcio, quasi que estagnadas, em ambiente tranquilo e pouco ventilado, só perturbado pelo gotejar lento mas contínuo, das águas do teto. Nos pisóides "pérolas" o germe de cristalização mais comum é o quartzo, enquanto nos "deformados" os aglomerados cristalizados aparecem com mais frequência formando os núcleos.

Vários outros aspectos espeleológicos envolvidos no assunto são aqui relacionados.

ABSTRACT

The pisolith genetic processes in the limestone caves are not yet well known, not only due to its scarce occurrences but also because the literature on this subject is still rare.

Beautiful specimens, many of them with layers of perfect rhythm and sphericity, were found in some caves in Iporanga Município, State of São Paulo, Brazil, and they furnished an additional contribution to the literature on this subject.

The so called "cave pearls" are morphologically related to the "basins" or "pools" receptacles, in which clear and concentrated solutions of calcium bicarbonate are found almost stagnant, and the environment is calm, usually disturbed only by the continuous dropping of the water from the cave ceiling.

In the pisolite - like "pearls", the quartz is the crystallization germ and in the deformed ones the crystalline agglomerates often appear as their cores.

Finally many others speleological aspects received an adequated approach to the subject.

Inúmeros são os depósitos minerais que ornamentam a superfície interior das cavidades naturais existentes nas rochas, com formas bizarras, pitorescas e, por vezes, até fantasmagóricas, fascínio dos espeleólogos. São formados por favor de processos químicos, de dissolução e precipitação ou de dispersão coloidal e floculação, correlacionados com a circulação das águas subterrâneas que percorrem as pequenas e grandes aberturas existentes nas rochas da parte sólida terrestre. Tomam o nome genérico de "espeleotema", de origem grega – spelation (caverna) e thema (depósito).

Influem na intensidade, dimensão e conformação dessas precipitações ou floculações, diversos fatores relacionados ao veículo das soluções ou suspensões salinas e ao ambiente dos acontecimentos físicos e químicos que geram os espeleotemas. Destacam-se os seguintes:

- a) a supersaturação das soluções,
- b) a velocidade de escoamento da solução ou suspensão,
- c) o volume ou vazão das águas circulantes,
- d) o conduto de escoamento,
- e) o relevo do local de deposição,
- f) a temperatura na cavidade onde se processa a deposição,
- g) o grau higroscópico e a circulação do ar na cavidade onde a deposição se processa.

A deposição dos sais ou dos gels se inicia, geralmente, quando a sua concentração, isto é, a quantidade presente por unidade de volume líquido, atinge um valor crítico. Porém, para que a deposição constitua um espeleotema é necessário que a gota do líquido, portadora do futuro mineral, ao emergir dos seus condutos rochosos, permaneça por um certo tempo nas bordas dos orifícios ou nas bacias superficiais, para permitir a tranquila deposição das substâncias, geral-

mente carbonatos ou hidratos. Esse tempo é função da velocidade de escoamento das soluções ou suspensões líquidas (foto 1).

Enquanto que a dimensão do espeleotema é condicionada pela vazão e volume das águas circulantes, a forma, em suas características predominantes, é influenciada pelos condutos de escoamentos dos líquidos e pelo relevo do local de deposição. Assim é que os poros, que só permitem exsudação, produzem espeleotemas bem diferentes dos existentes nas áreas de fraturas ou diaclases. Também, nas bacias a deposição adquire formas outras que as presentes nas paredes das cavidades, que, por sua vez, são diferentes daquelas existentes nos tetos.

Os outros fatores enumerados – temperatura da cavidade, grau higroscópico e circulação do ar – influem na evaporação do meio aquoso, aumentando ou diminuindo o grau de concentração dos sais ou gels e, portanto, favorecendo ou dificultando o ritmo da deposição.

Da combinação das multiplas facetas desses fatores com as variadas composições químicas dos solutos, é que se originam as miríades das mirificas formas de espeleotemas, onde predominam as constituídas pela:

calcita – carbonato de cálcio romboédrico,
aragonita – carbonato de cálcio ortorombico,
gipsita – sulfato de cálcio monoclinico,
gotita – óxido de ferro hidratado romboédrico,
psilomelana – óxido de manganês hidratado monoclinico,
malaquita – carbonato de cobre hidratado monoclinico
mirabilita – sulfato de sódio hidratado monoclinico
calcedonia e opala – sílica amorfa ou microcristalina;
com colorações, muitas vezes, fornecidas pelos microconstituintes que impurificam os líquidos circulantes, tal como o cobre nas formas da gruta do Morro do Chumbo (foto 2 a 11).

Foto 1 – Gota d'água – Solução saturada de bicarbonatos – ao depositar carbonatos na extremidade inferior de uma estalactite.



Foto 2 – Espeleotema de carbonato de cálcio, na Gruta de Santana, no município de Iporanga, S.P., constituído de calcita.

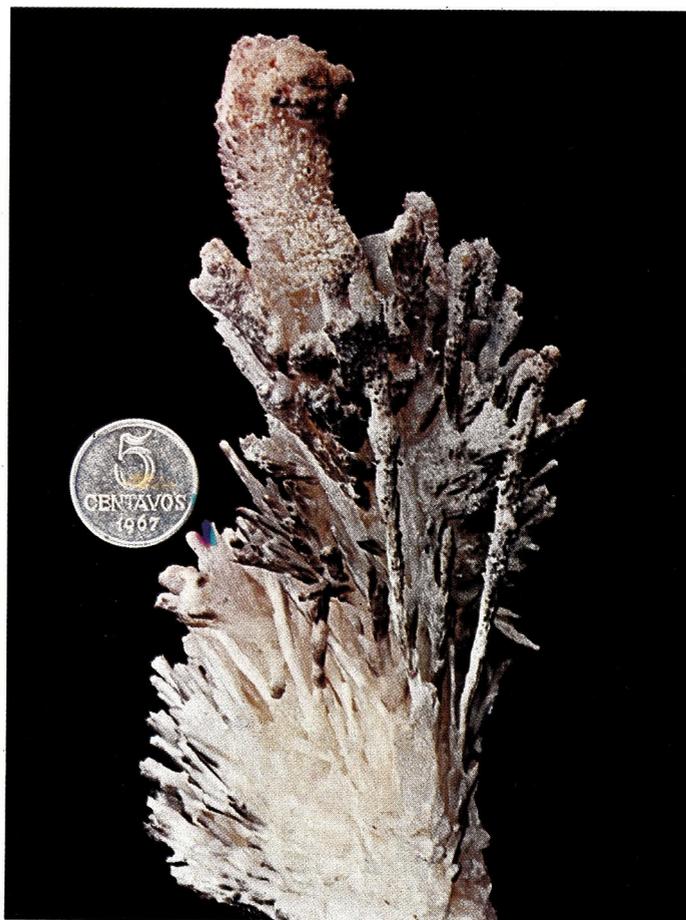




Foto 3 – Espeleotema de carbonato de cálcio, na Gruta da Fazenda Santa Leonor, no município de Taubaté, S.P., constituído de aragonita.

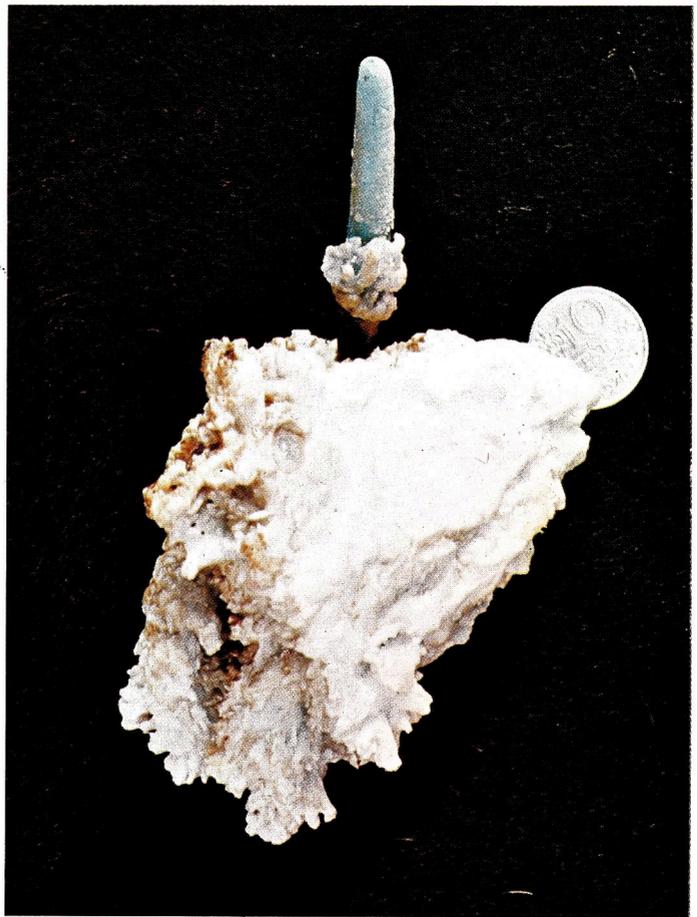


Foto 4 – Espeleotema de carbonato de cálcio, na Gruta do Morro do Chumbo, no município de Iporanga, S.P., constituído de calcita-aragonita, coloridas por sais de cobre.



Foto 5 – Espeleotema de carbonato de cobre, na Gruta da Mina de Cobre Santa Blandina, no município de Itapeva, S.P., constituído de malaquita.



Foto 6 – Espeleotema de sulfato de cálcio, na Gruta de Santana, no município de Iporanga, E.S.P., constituído de gipsita.

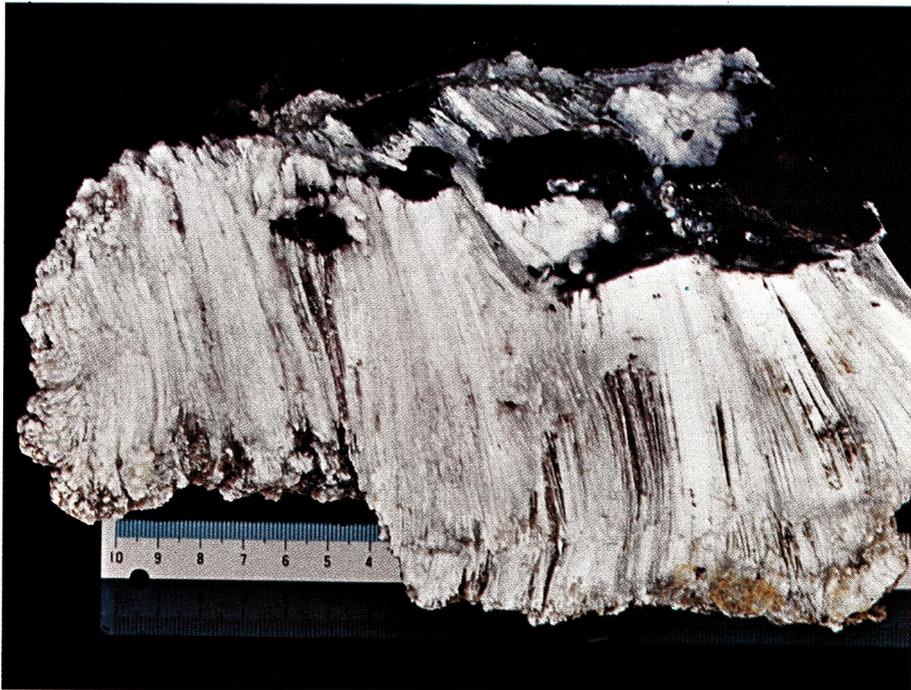


Foto 7 – Espeleotema de sulfato de sódio, constituído de mirabilita, encontrado em lapas e cavidades da região sudoeste do Estado da Bahia.

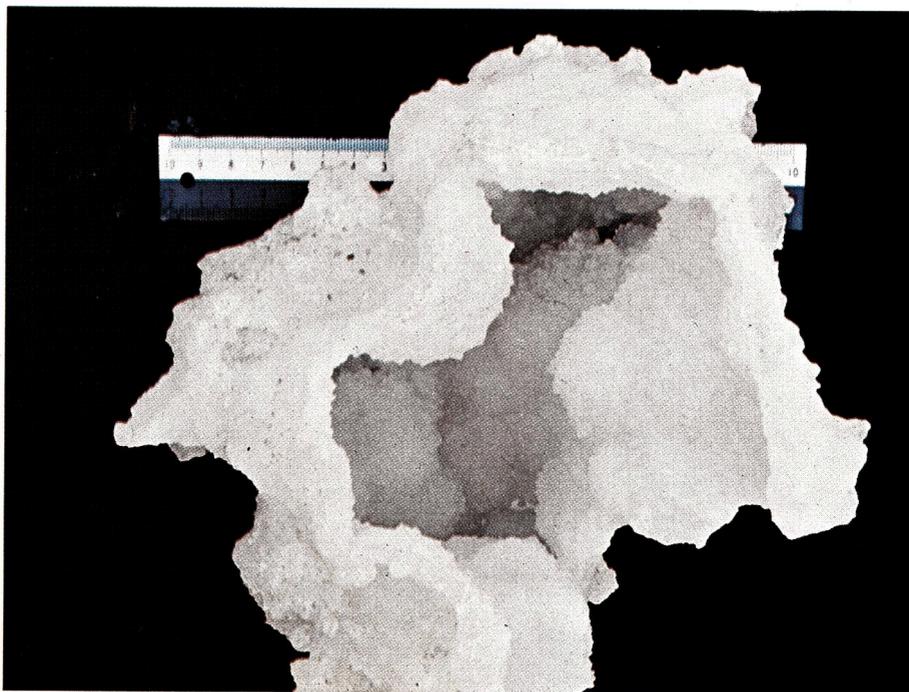


Foto 8 – Espeleotema de óxido de silício, constituído de calcedonia, encontrado em cavidades de calcários, do cretáceo superior, das pedreiras da Companhia de Cimento Portland Ponte Alta, em Uberaba, M.G..



Foto 9 – Espeleotema de óxidos de ferro, constituído de gotita-limonita-hematita, encontrado em cavidades de rochas vizinhas a depósito de magnetita, em Pirapora do Bom Jesus, E.S.P..



Foto 10 – Espeleotema de óxidos de manganês, constituído de mangânico, encontrado nas cavidades existentes no depósito manganês e ferro de Burnier, E.M.G..

Foto 11 – Formação calcária do pré-cambriano superior, mostrando relevo carstico, com fraturas onde estão esculpidas as cavernas mais importantes, em dimensões e ornamentações, do Vale do Rio Ribeira, no E.S.P..

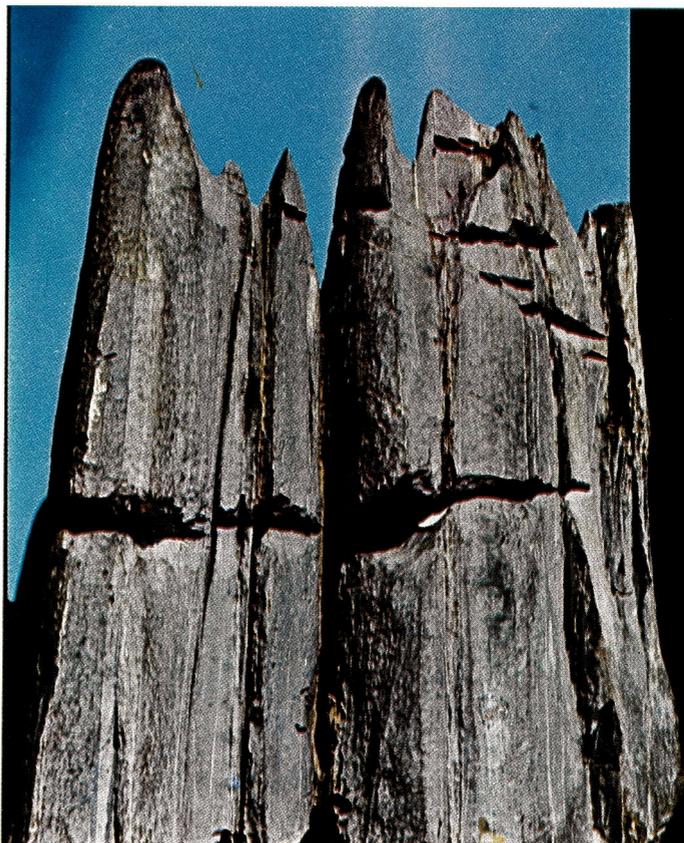


Foto 12 – A direita, espeleotema de calcita, da Gruta do Monjolinho, em Iporanga, E.S.P., e a esquerda, espeleotema de aragonita, da Gruta da Fazenda Santa Leonor, em Taubaté, E.S.P..

A maioria das ornamentações mais belas e monumentais das cavernas é constituída pelo carbonato de cálcio, consolidado como calcita ou aragonita, em cavidades de rochas denominadas genericamente de calcários. É o carbonato de cálcio trazido, por soluções aquosas de origem superficial, com adição de anidrido carbônico, na forma de bicarbonato, por favor de dissoluções em regiões afastadas. Quando as águas atingem as extremidades de escape, de seus condutos, ou bacias de acumulação, por força do alívio da pressão, do aumento de temperatura ou evaporação do soluto, diminui a solubilidade do CaCO_3 e há, então, a precipitação do carbonato, num processo inverso daquele que o retirara das rochas distantes.

A origem do carbonato de cálcio existente nas formações rochosas da natureza é um dos problemas mais fascinantes para os estudiosos de geologia. Muitas pesquisas ainda deverão ser feitas para que sejam esclarecidas as dúvidas existentes sobre as alterações físicas e químicas que acompanham a precipitação e a recristalização dos minerais metaestáveis das rochas carbonatadas. Mas hoje já se pode afirmar que a maioria das deposições modernas de sedimentos carbonatados é constituída de minerais carbonáticos metaestáveis — aragonita, calcita com alto magnésio e vaterita (foto 12). Posteriormente, na superfície ou em profundidade, recristalizações se processam, ou por recristalizações no estado sólido ou por dissolução e reprecipitação, transformando as formas metaestáveis em minerais carbonáticos estáveis. Assim, a recristalização de aragonita em calcita pode ser possível ou por sua dissolução e reprecipitação como calcita, ou por reação inter-sólidos, na chamada "inversão polimórfica". Porém, o ion magnésio em contato com a aragonita pode ser capaz de prevenir indefinidamente a recristalização desse mineral como calcita, pelo processo de solução e reprecipitação. R.L. Curl (1926) em artigo publicado no boletim da Sociedade Nacional de Espeleologia dos Estados Unidos, acrescenta, ainda, que durante o processo inorgânico de precipitação a úmido de carbonato de cálcio, o ion magnésio é o principal

inibidor da formação da calcita. Si a concentração do ion magnésio persiste as partículas de carbonato metaestável preservadas podem ser cimentadas por aragonita, o que previne a recristalização, em larga escala, da aragonita em calcita por solução e reprecipitação. Também, o ion estrôncio é capaz de prevenir a recristalização da aragonita como calcita, mas a concentração desse ion deve ser muito mais alta, relativamente, que aquelas encontradas nas soluções que comumente percorrem a crosta. A temperatura, identicamente, afeta fortemente a velocidade e a proporção da transformação da aragonita em calcita. Si de um lado, o aumento de temperatura provoca o aumento da proporção da cristalização de aragonita em calcita, de outro, Linck (1903) e outros pesquisadores acentuam a tendência de precipitação de aragonita em áreas tropicais e de calcita em climas temperados. Cloud (1926) apontou que nessas precipitações, quando a supersaturação diminui, a deposição dos minerais de cálcio, presentes nas soluções, obedece a ordem seguinte: vaterita — aragonita — calcita. Pobeguín (1954), dentro de outro aspecto, relaciona a precipitação do carbonato de cálcio, numa ou noutra forma mineral, à velocidade de difusão dos ions CO_3 e Ca, isto é, ao número de ions presentes num dado ponto a um dado momento. Assim, uma solução altamente saturada favoreceria a precipitação do composto mais solúvel, de mais alta energia e polimorficamente menos ordenado.

Nas cavernas, os experimentos de J.W.Murray (1954) mostraram que a presença do bicarbonato de magnésio ou a substituição do ion Mg ou, ainda, uma maior relação Mg/Ca, produz uma maior quantidade de aragonita que de calcita, nas precipitações de carbonato de cálcio. Observa, também, Murray que a presença do estrôncio e do chumbo, assim como, o aumento da temperatura, elevam a proporção de aragonita nos precipitados, a qual, normalmente, é maior no final que no início das deposições. F.R.Siegel (1965), em seu estudo sobre as formas da caverna Great Onyx, no Kentucky, U.S.A., confirma parte das conclusões de Murray. Esquemáticamente o ciclo de formação dos espeleotemas das grutas calcárias poderia ser sintetizado no desenho aqui constante.

Quanto a origem, os espeleotemas podem ser relacionados dentro de 3 categorias, conforme o tipo de movimentação das suas soluções matrizes. A primeira inclui as formas oriundas da deposição do carbonato de cálcio por águas que continuamente se movem, principalmente, por favor da ação da força da gravidade, ao longo das paredes, do teto e do solo das cavernas, pelos condutos naturais existentes nas rochas encaixantes. Nesses depósitos, denominados "DEPÓSITOS DE ÁGUAS CIRCULANTES", se incluem as ornamentações mais belas e espetaculares, particularmente pelas suas dimensões e número. As estalactites, os canudos de fresco, as cortinas, os reposteiros e as colunas dependuram-se artisticamente nos tetos das grutas como pingentes e lustres cristalinos. As estalagmites, as marquises, as concreções, os terraços, os onixes, os conglomerados, as nitreiras, o travertino e os blocos de desabamento, cada um com sua forma extravagante, como que tapetes, enfeitam o solo argiloso ou rochoso das cavernas (fotos 13 a 17). Nos "DEPÓSITOS DE ÁGUAS ESTAGNADAS", em reentrâncias do piso, formas de tamanho reduzido, como os dentes de cão, as bolachas, as jangadas e as bolhas, refletem a presença da atividade química das águas aí represadas (fotos 18 a 20). Porém, são as precipitações dos sais dissolvidos nas águas existentes nos poros das rochas da cavidade que produzem os mais delicados e originais espeleotemas. Os "DEPÓSITOS DE ÁGUAS DE EXSUDAÇÃO", as helectitas, os escudos, os corais, as flores, os cabos, os blisters e o leite da lua, são os característicos da beleza incomparável desses depósitos, formados pelo lento e descontínuo movimento das águas através dos vazios intercrystalinos, em direção à superfície exterior (fotos 21 e 22).



Foto 13 – Espeleotemas (estalactites) ornamentados lateralmente, denominados “Sombrinhas Japonesas”, da Gruta Santana, em Iporanga, E.S.P..

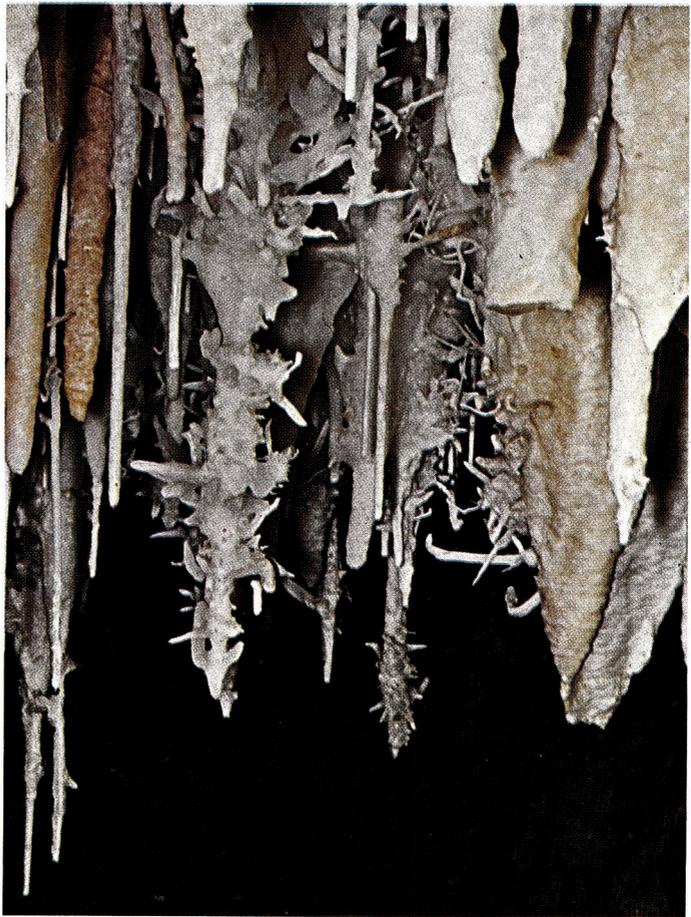


Foto 14 – Conjunto de espeleotemas, stalactites ornamentadas lateralmente com helectitas, dependurado no teto da Gruta Santana, em Iporanga, E.S.P..



Foto 15 – Espeleotemas, denominados “Canudos de Refresco”, constituídos por estágio de formação primário bem desenvolvido de estalactite, da Gruta do Monjolinho, Iporanga, E.S.P.. Estas peças possuem canal central bem definido e delgadas paredes.



Foto 16 – Conjunto de espeleotemas (estalactites soldadas) com ornamentações e assemelhando-se a um conjunto de estatuária humana, da Gruta da Pedreira Votorantim, em Bonsucesso, Itararé, E.S.P..



Foto 17 – Espeleotema (estalactite) com encurvamento semi-circular, formando um “arco”, da Gruta da Pedreira Votorantim, em Bonsucesso, Itararé, E.S.P..



Foto 18 – Espeleotema formado por placas de calcita, denominado “Bolachas”, na Gruta da Pedreira Votorantim, em Bonsucesso, Itararé, E.S.P..



Foto 19 – Espeleotema em forma de uma grande placã, com superfície ondulada, denominado “Bolacha”, encontrado na galeria da Mina de Fluorita, em Santa Luzia, E. Paraíba.



Foto 20 – Formas diversas de espeleotemas denominados “dente de cão”, cristais alongados de calcita, encontrados na Gruta Santana, em Iporanga, E.S.P..



Foto 21 – Helectita extremamente desenvolvida, semi-transparente, com formas reentrantes, da Gruta Santana, Iporanga, E.S.P..



Foto 22 – Conjunto de espeleotemas, com estalactites, helectitas e coluna, dependurado no teto e parede da Gruta Santana, em Iporanga, E.S.P..

Mas de todos os caprichosos e estranhos espeleotemas que povoam o mundo cavernícola são os oólitos e os pisólitos, com sua estrutura laminada e concêntrica, que mais atraem a curiosidade dos cientistas e mais surpreende a atenção dos espeleólogos. O termo "oólito" foi usado pela primeira vez por Bruckmann, em 1727, porém já Plínio o Antigo, no início da nossa era cristã, descrevia texturas que podem ser consideradas como de oóides (Cayeux, Carozzi — 1970). Em 1664, Robert Hook, publicou em seu trabalho "Micrography" referências sobre partículas minerais de forma esférica, encontradas em certos sedimentos terrestres, desde o precambriano, despertando, assim, a atenção dos investigadores científicos para a busca da origem desses tão estranhos grânulos minerais arredondados. Tanto, assim, que, quando a geologia começou a ganhar a ordenação metódica das ciências, D'Croust (1857), Sorby (1879), Seeley (1888), Nicholson (1888), Rothpletz (1892), Link (1903) e Brown (1914) publicaram os resultados de pesquisas dirigidas para a explicação da origem, formação e constituição mineralógica desses caprichosos agrupamentos minerais, já, então, denominados de acordo com as suas dimensões em: "oólitos" os de diâmetro menor que 2 milímetros e "pisólitos" os de diâmetro maior que 2 milímetros. Modernamente, mais apropriadamente, designa-se esses agrupamentos esféricos ou sub-esféricos, compostos de duas partes — núcleo e envoltório, com estrutura concêntrica e radiada, por "oóides", reservando-se o termo "oncolito" ou "oólito" (do grego "oon" — ovo e "lithos" — pedra) para as rochas compostas de oóides. Correspondentemente, o termo "pisólito" deve ser substituído por "pisóide", quando usado

para especificar a unidade cristalina. Em 1928, W.H. Emmons fez ligeira referência ao encontro de tais formações na mina de chumbo, em Lead, S.D., U.S.A. (fotos 23 e 24).

Mas, foi Frank L. Hees (1929), quem por primeiro publicou uma descrição detalhada dedicada aos oóides das cavernas. Amostras coletadas por Willis Lee, de pequenas esferas de carbonato de cálcio, ainda em desenvolvimento, em crateras ou bacias de dimensões reduzidas, existentes no piso modelado em calcário permeano da Gruta de Carlsbad, no sudoeste do Novo México, foram por Hees, estudadas, quando, então, as denominou de "cave pearl", "pérola de caverna" ou "hohlempirlen", por sua estrutura concêntrica, laminada e composição química semelhante às das pérolas gemológicas da ostra. As pesquisas de Hess abriram caminho para estudos de vários outros autores, dos quais os de Donahue (1962), Kirchmayer (1964), Siegel (1965) e Bathurst (1971) são os mais gerais e importantes. A única notícia da presença de tais formas em grutas brasileiras é de autoria de Guimarães (1963).

No Estado de São Paulo as "pérolas de cavernas" são encontradas nas grutas do Chapéu, Água Suja, Pescaria, Pérolas, Alambari de Cima e do Barroteado, tôdas no município de Iporanga, na região conhecida como Vale do Ribeira. A originalidade de suas formas e a beleza das suas seções, quando polidas, tornam a estória de sua formação fascinante e interessante, tanto para os especialistas como para os leigos interessados pela natureza (foto 25).



Foto 23 – Conjunto de pisóides, sem deformações na sua esfericidade, denominados “pérola de caverna”, das grutas do Chapéu e das Pérolas, em Iporanga, E.S.P..



Foto 24 – Conjunto de pisóides, com deformações e ornamentações superficiais, das Grutas do Chapéu e da Pescaria, em Iporanga, E.S.P..



Foto 25 – Conjunto de pisóides cortados e polidos – pérolas das cavernas – das grutas da Pescaria e do Chapéu, em Iporanga, E.S.P..

de calcio e Cayeux (1935), Hatch (1938) e Danahue (1965) mostraram que os oóides crescem numa variedade muito grande de ambientes onde a fotossíntese é impossível. Assim, consolidou-se a teoria que responsabiliza as soluções inorgânicas como responsáveis pelo aparecimento da maioria dessas estruturas nas suas diversas ocorrências e, em particular, nas cavernas ou grutas.

O início da formação dos oóides se dá com a precipitação dos carbonatos em torno de um núcleo, estranho ou não ao precipitado, que se ache, no momento desejado, em condições adequadas para servir de suporte ao desenvolvimento da forma. A natureza mineralógica dos núcleos ou germens de cristalização depende, em geral, da constituição geológica das rochas vizinhas ou encaixantes da gruta, fornecedoras do material detrítico estranho. Pode ser um simples mineral, como o quartzo, o feldspato, a mica, a granada, o epidoto ou um aglomerado cristalino, tal como fragmentos de rocha ou de blocos de calcita pré-formada. Weyl (1967), em água do mar, mostrou que logo depois de colocado um núcleo, de tamanho maior que uma partícula coloidal, a precipitação da aragonita, do envoltório do oóide, tomava lugar independentemente da natureza mineralógica desse núcleo e da existência ou não de outras partículas coloidais na água (Fotos 26 e 27).

As considerações seguintes tentarão mostrar muitos dos aspectos envolvidos com a presença dos oóides nas grutas ou cavernas calcárias. Inicialmente é necessário que se mencione que na natureza não se encontra somente oóides de carbonato de cálcio. Pode-se deparar, também, com oóides constituídos de sílica, silicatos, fosfatos, bauxita, barita e de compostos de ferro (óxidos, hidróxidos e sulfeto). Porém, nenhum deles, excede em beleza e harmonia os de carbonato de cálcio, apelidados de "pérolas de caverna", e formados nas profundezas misteriosas das grutas. Também, o ambiente de formação dos oóides mostra idêntica variação. Apresentam-se em cavidades subterrâneas, fontes termais, minas abandonadas, lagoas e mares. Até mesmo uma panela, onde água "dura" é fervida, como narra Bathurst (1971), ou caldeiras acionadas com água rica em bicarbonato de cálcio (Cayeux, 1970), podem mostrarem-se povoadas de diminutos oóides.

O encontro de algas em núcleos de oóides marinhos encorajou alguns autores, como Rothpletz (1892), a formularem a hipótese que a eles atribuiu a origem orgânica. Drew (1914) atribuiu a bactérias o início da geração das formas concêntricas dos oóides. Porém, nem uma, nem outra, dessas hipóteses teve sua generalização persistindo por muito tempo. Newell (1960), ao estudar os oóides com algas como núcleo, provou que não há nada que permita afirmar que tais organismos tenham tomado parte diretamente na precipitação do carbonato



Foto 26 – Pisóide deformado, com núcleo de concreção de aragonita, da Gruta da Pescaria, no município de Iporanga, E.S.P.. A retimicidade da forma começa a surgir após uma zona de deposição irregular, inclusive com vazios.



Foto 27 – A bela estrutura esferoidal, com leitos alternados de cores claras e escuras, de uma “pérola de caverna”, com núcleo gerador constituído por cristal de quartzo, da Gruta do Chapéu, em Iporanga, E.S.P.. Nesta estrutura a ritimicidade foi adquirida rapidamente, a zona de deposição irregular é de pequena expressão.

Bathurst (1968) ampliou ainda mais o quadro representativo dos tipos de nucleos, citando oóides formados a partir de lamas coloidais de aragonita, algumas agregadas entre si, por efeito inorgânico de superfície. Há, também, notícias de oóides formados em torno de grãos de carvão e de, até, pedaços de arame (Bathurst, 1971).

A partir do nucleo ou germen o oóide cresce com a adição de lamina concéntricas e sucessivas do precipitado que irão constituir o seu envoltório. Essas suas camadas têm espessuras variáveis, desde de dezenas de micros até cinco milímetros, conforme as variações anuais das condições locais de hidrologia e meteorologia. Weyl (1967) conclui que o crescimento dos oóides segue um ciclo, que se inicia com um estágio de precipitações rápidas, seguido de uma fase de crescimento progressivo, com precipitações e solubilizações cada vez menores e termina com a consolidação das formas por cimentação ou por afundamento em lamas do piso. A laminação concéntrica pode, muitas vezes, ser substituída na sua apresentação individual por estruturas fibro-radiadas, principalmente quando o mineral é a calcita. Os pacotes lamelares unitários são diversamente coloridos, com tonalidades claras e escuras, alternadamente, causa do belo aspecto que possuem os exemplares cortados e polidos (Fotos 28 e 29).

Certamente a tonalidade e o tipo da côr desses leitos dependem da impureza dominante na época da formação. Ao que tudo indica cada leito, com sua côr característica, corresponde a uma época de formação, com condições físico-químicas peculiares de concentração das soluções, de impurezas dissolvidas e de ambiente local. Ciclicamente repetiam-se essas condições, com soluções claras e escuras, que Baker (1951) correlaciona às variações estacionais — inverno e verão —, tal como acontece a certas rochas sedimentares, como o varvito. Os leitos claros seriam resultantes de águas claras, de infiltrações morosas e prolongadas, comuns no inverno, e os escuros das volumosas e turvas águas das estações chuvosas (Foto 30).

Em muitos casos, antes de adquirirem a regularidade e perfeição da deposição concêntricas esferóidais, os oóides passam por uma etapa de transição, onde ou, dois ou mais oóides incipientes, ou granulos de aragonita de aspecto mamílonar, se agregam em torno do nucleo, para, a seguir, suportarem a sedimentação rítmica (Foto 31).

Também, no caso dos oóides e dos pisóides, pairam as mesmas duvidas sobre a estrutura e o minerais presentes nas formas iniciais, tal como as anotadas para as formações dos outros espeleotemas. Radomski (1967) mostrou que, em alguns casos, a laminação concêntrica pode ser substituída por textura fibro-radiada. Bathurst (1968) sugere que peças monoleitos iônicos, com estrutura de aragonita, podem ser agregadas por adsorção às superfícies dos oóides, segundo o seu maior eixo paralelo a lamina. Em um outro aspecto, há indícios que a calcita fibrosa pode resultar de agulhas cripto-cristalinas de aragonita mascarando toda a composição inicial do oóide. As afirmações de Murray (1954), bem como as de Siegel (1965) e Siegel-Reams (1966), sobre a influência do pH, da temperatura e da composição iônica das águas circulantes, na formação dos espeleotemas, também, parecem ser válidas aqui. Regra geral, os oóides recentes são de aragonita ou de calcita-aragonita (Hatch, 1938) e os mais antigos são de calcita. Excepcionalmente, as pérolas de cavernas, são mais de calcita que de aragonita, possivelmente devido a temperatura em que são formadas e a ausência de outros íons que não o de cálcio nas soluções. A maioria das laminas, quer claras, quer escuras, das pérolas das cavernas das grutas da Pecaria e do Chapeu, são constituídas por calcita, não reagindo com solução de nitrato de cobalto. Somente, num dos exemplares, uma das laminas claras mostrou a coloração lilás, característica de aragonita, com a reação de Meigen. Nas cavernas, escavadas em calcário magnesiano, o íon Mg pode prevenir a recristalização da aragonita em calcita e permitir a participação do carbonato ortorombico nas formas finais.



Foto 28 – “Pérola de caverna”, com estrutura esferoidal perfeita e leitões alternados de cores creme e branca, da Gruta do Chapéu, município de Iporanga, E.S.P.. A parte externa é ornamentada e a interior foi destacada para mostrar a perfeição e o polimento das camadas constituintes.



Foto 29 – Pisóide, com predominância de tonalidades escuras na sucessão de camadas que o constitui, da Gruta da Pescaria, município de Iporanga, E.S.P.. A esfericidade também está prejudicada na forma, particularmente nas áreas mais a direita.



Foto 30 – Pisóides e "Pérolas" com camadas concêntricas bem definidas, alternadamente coloridas, das Grutas do Chapéu e Pescaria, em Iporanga, E.S.P..



Foto 31 – Pisóide com camada intermediária desordenada, inclusive com vazios e camada exterior tendendo a adquirir a esfericidade peculiar à estrutura, Gruta da Pescaria, Iporanga, E.S.P..

Na composição química de qualquer das formas das "pérolas das cavernas" predomina o carbonato de cálcio. O teor de impurezas aumenta com a tonalidade da coloração dos leitos. A sílica, a alumina e os óxidos de ferro, presentes como colóides nas soluções alcalinas circulantes são os responsáveis pelos maiores teores de elementos estranhos. Análises de pérolas claras, de Great Salt Lake, e de pérolas escuras da Gruta da Pescaria, dão idéia da variação das percentagens das impurezas (em %):

	GRUTA DA PESCARIA	GREAT SALT LAKE
CO ₂	40,4	41,1
SiO ₂	4,9	4,1
Fe ₂ O ₃	1,9	traços
Al ₂ O ₃	1,6	0,2
CaO	50,4	51,1
MgO	1,0	0,7

A velocidade de crescimento dos oóides e das "pérolas de cavernas" é outro assunto de difícil abordagem pela sua imprecisão, visto que o ambiente de deposição e o suprimento de soluções supersaturadas de bicarbonato de cálcio devem ter variado através do tempo, não permitindo, assim, a permanência das mesmas condições de influência nas precipitações pelos anos necessários à obtenção das suas dimensões. Entretanto, em certos casos, quer pelos aspectos das outras ornamentações presentes na caverna, quer pelo número e constância de observações realizadas desde o aparecimento das primeiras lâminas do pisóide, pode-se crer que não tenha havido mudanças sensíveis nessas condições genéticas e, então, aventurar-se no campo dos cálculos de idade. Mackinstry (1932) encontrou pisóides, em Iron Mountain, com diâmetros de até 5 centímetros, em galerias de mina abandonada há 40 anos, o que dá um crescimento de 1,25mm/ano. Davidson (1931), em "drifts" abertos há 25 anos, em São Dimas, no México, colheu pé-

rolas com 3 centímetros de diâmetro, com crescimento, portanto, equivalente a 1,20 mm/ano. Esse mesmo pesquisador observou o crescimento de oóides, em torno de germens, por ele semeados, em minas abandonadas, com a velocidade de 1 mm/ano. Donahue (1965), em laboratório, gotejando solução supersaturada de bicarbonato de cálcio em cápsula de porcelana com oóides já formados de 4 mm de diâmetro, conseguiu a formação de uma nova lamina de calcita, com 5 leitos, com a espessura total de 0,17 mm, em apenas 6 meses (0,34 mm/ano), o que, segundo ele seria 1,5 a 2,5 maior que o crescimento possível de ser observado nas cavernas naturais. Também, si válida a hipótese da correspondência dos leitos claros com o inverno e dos leitos escuros com o verão (Baker, 1951), um processo para a confirmação das velocidades de crescimento obtidas nessas observações, em tempo relativamente pequeno, seria o de dividir o comprimento do diametro das esferas dos grandes pisóides pelo número de pares de leitos concêntricos. Com peças das grutas do Chapeu e da Pescaria o Autor, em seções polidas, obteve as medidas seguintes: 2,6cm – 26 leitos (13 anos); 3,2cm – 34 leitos (17 anos); 2,0cm – 20 leitos (10 anos); 3,0cm – 30 leitos (15 anos); 1,7cm – 14 leitos (7 anos); 2,8cm – 22 leitos (11 anos); isto é, que correspondem a um crescimento médio de 2mm/ano, valor pouco superior àqueles obtidos pelos autores citados. Assim, face a diversidade das condições dos ambientes o. de estes resultados foram obtidos, não será temeridade afirmar-se que as pérolas de cavernas crescem numa velocidade que varia entre 0,2 a 2 milímetros por ano. Convem lembrar que, conforme as observações de Weyl (1967), a medida que as formas oóides evoluem tende haver diminuição no ritmo das deposições, até a suas consolidações, quando cimentadas.

É o aspecto cinético que e o mais fascinante e original dos fenômenos envolvidos na formação das "pérolas das cavernas". Inclui ele 3 ordens de assuntos, a saber: relevo favoravel, agitação e força de cristalização. Todas as observações, bem como todos os autores, indicam que os oóides ou pisóides das cavernas são encontrados somente em pequenas bacias ou cubas escavadas no piso das grutas calcarias, que impedem o desgarre das formas do ambiente propicio à formação (Fotos 32 e 33).

Em geral, a forma e o relêvo dessas depressões, que retêm as soluções supersaturadas em bicarbonato de cálcio, têm íntima relação com a morfologia das pérolas. Nas de superfície regular, plana e uniforme, é possível o aparecimento de perolas polidas ou porcelanizadas, enquanto que as rugosas e irregulares só permitem achados com superfície grosseira e deformada (Fotos 34 e 35).



Foto 32 – “Bacia” onde o gotejar das águas do teto e a estagnação das águas do piso permitiram a formação de pisóides a partir de águas saturadas em bicarbonato de cálcio, na Gruta de Pescaria, Iporanga, E.S.P.. A aspereza do relevo do berço só possibilitou o aparecimento de formas deformadas.



Foto 33 – “Bacia” com superfície regular e permanente gotejar de água do teto que permitiram a formação de “pérolas de caverna” na Gruta de Chapéu, município de Iporanga, E.S.P..



Foto 34 – Belíssima “pérola de caverna”, com superfície exterior rugosa formada após cessadas as condições de gotejamento e circulação lenta, quase estagnação, responsáveis pela sua formação. Gruta do Chapéu, Iporanga, E.S.P..



Foto 35 – Pisóides com superfícies deformadas, não circulares, por condições de relevo da “bacia” e circulação de águas insatisfatórias, Gruta do Barroteado, Iporanga, E.S.P..

Discutível e polemica é a influência do grau de agitação das soluções matrizes na formação das pérolas. Ainda que, em certos locais, como em mares, seja possível, como afirma Bathurst (1967), a presença de oóides em áreas de baixa turbulência, quase estagnadas, nas cavernas e em outros ambientes a importância do papel da agitação, na formação de oóides e pisóides, é incontestável. Nas fontes, como em Carlsbad (Cayeux, Carozzi-1970), os oóides são gerados por águas artesianas e mantidos permanentemente em agitação e, também, nos mares (Bathurst-1971), a turbulência existente no nível dos baixios, onde predomina a formação dos oóides, auxilia sensivelmente o crescimento das formas, apesar do aumento da abrasão. Nas grutas ou cavernas, as únicas dúvidas existentes referem-se sobre a relação entre a quantidade de agitação e a perfeição da conformação das impeccáveis estruturas oóides. Coombs, citado por Davidson e Mackinstry (1931), chegou a medir o giro de 1/4 de volta de pisóides em desenvolvimento, com até dois centímetros, em depressões com gotejamento espaçado de um segundo. Sem dúvida, num dado ambiente, a agitação deve ter variado com o correr das épocas que presidiam a formação dos oóides e pisóides. Dai ser difícil justificar, só com a agitação, a regularidade observada nas lamina de calcita ou aragonita, particularmente, nos maiores e perfeitos pisóides, como das grutas do Caboclo e das Pérolas, com até 5 centímetros de diâmetro, que dificilmente seriam movimentados constantemente com o simples gotejar de pingos de água (Foto 36).

Emmons (1928) e Davidson-Mackinstry (1931), em seus trabalhos, admitiram a hipótese que as pérolas de cavernas poderiam ser formadas em águas tranquilas de pouca movimentação. Davidson, para confirmar tal hipótese, semeou fragmentos de andesito de 6 centímetros cúbicos, em um poço com água aparentemente estagnada e pôde observar a formação de estruturas concêntricas regulares em torno desses germens de cristalização. Porém, as duas hipóteses de formação — com agitação e baixa agitação — podem ser harmonizadas com a ajuda da teoria

da "força de cristalização". Experimentos de Becker-Day (1916) e Taber (1916), mostraram que um cristal ao crescer, no interior de uma solução saturada, em condições normais de pressão e temperatura, pode levantar uma massa de material inerte colocada sobre seu topo por favor de uma força, denominada por Spry (1949) de "força de cristalização", cuja ação se manifesta desde que haja um filme líquido da solução entre o cristal e o seu suporte sólido, capaz de fornecer o composto para as precipitações (Weyl-1959). Assim, ao que tudo indica, é da composição desses dois fatores — agitação e força de cristalização — que resulta a maior ou menor perfeição e beleza das formas finais estruturais das pérolas das cavernas. Também, ao que parece, só com a movimentação contínua do oóide em crescimento, por favor do gotejamento ou do fluxo incessante, é que pode surgir pérolas "porcelanizadas", de lâminas leitosas, de esfericidade perfeita e com compactação de todos os seus leitos, por favor da abrasão constante e da igual pressão compactadora em todas as suas áreas recém-formadas. Em oposição, em águas onde a estagnação só é perturbada pelo rolar dos oóides, provocado pelo desequilíbrio resultante dos acréscimos de novos cristais de calcita ou aragonita pela "força de cristalização", a laminação concêntrica se deforma, em esfericidade e espessura, diminuindo sensivelmente a beleza das formas resultantes. No caso extremo, cessando completamente a agitação, pela falta de contribuição dos movimentos das soluções renovadoras e desaparecendo o filme líquido, entre o oóide e o seu suporte sólido, quer pelo peso ou forma dos edifícios cristalinos, quer pelo relêvo dos pisos, a estagnação, então completa, pode provocar a ornamentação difusa e assimétrica na camada exterior da pérola ou a sua cimentação, entre si ou com o solo, por favor dos carbonatos ainda presentes nas soluções mineralizantes. (Fotos 37 a 39).



Foto 36 – “Pérola de caverna” gigantes, com superfície externa polida, esfericidade perfeita, formada em condições ideais de gotejamento, circulação e saturação salina das águas, nas Grutas das Pérolas e Chapéu, em Iporanga, E.S.P..



Foto 37 – “Pérola de caverna” com superfície porcelanizada. A “Janela” aberta mostra que a porcelanização é uma constante da estrutura e particularmente notada nas faixas brancas do conjunto. Gruta do Chapéu, Iporanga, E.S.P..



Foto 38 – “Bacia” com pérolas cimentadas, após o ciclo de formação, pelo carbonato de cálcio das águas de circulação, na Gruta do Chapéu, Iporanga, E.S.P..



Foto 39 – Corte polido de uma “Bacia”, com “pérolas” cimentadas, mostrando a disposição radial das camadas onduladas da calcita constituinte do cimento e do piso do berço, ao lado da perfeita estrutura esferoidal das “pérolas”. Gruta do Chapéu, Iporanga, E.S.P..

A forma e o aspecto exterior das "pérolas das cavernas" dependem, também, do grau de movimentação, do relevo da bacia de deposição, do núcleo detritico disponível, do índice de supersaturação das soluções portadoras do carbonato de cálcio, da temperatura ambiente, da ventilação, do fluxo e volume das soluções e das impurezas presentes por ocasião das precipitações. Em geral, apresentam-se com as características formas esféricas ou arredondadas. Porém, ao lado das "pérolas das cavernas" aparecem oóides de formas diversas, tais como os alongados ("bastões"), os ovais ("ovóides"), os poliédricos (geralmente "cubos"), os ornamentados superficialmente ("ouriços"), os de seção elipsoidal ("discóides"), os só ornamentados superiormente ("coroados"), os de aspecto rugoso ("ata"), os de baixa compacticidade ("mole") e os de alta dureza ("duros"). Essas deformações se dão: ou quando o oóide, ainda, se encontra no estado plástico, como no caso dos "discóide" e dos "ovóides"; ou pela interferência de dois ou mais oóides em crescimento (nos "bastões" e "poliedros"); ou pela alteração no fluxo das soluções (nos "ouriços" e "coroados"); ou pela influência das formas ou dimensões do núcleo ou germen (na "ata"); ou, finalmente, pela erosão de formas pré-formadas, como no caso dos "dados". As fotos seguintes mostram exemplares de oóides, com as formas citadas, das grutas do município de Iporanga, Estado de São Paulo (Fotos 40 a 47).



Foto 40 – Pisóides deformados e com superfícies externas com abundantes ornamentações individuais, denominados “ouriços”, encontrados na Gruta da Pescaria, Iporanga, E.S.P..



Foto 41 – Pisóide deformado com superfície externa totalmente ornamentada com mamilos de calcita posterior, denominado “ata”, encontrado na Gruta da Pescaria, Iporanga, E.S.P..



Foto 42 – “Pérolas de cavernas coroadas”, resultantes de ornamentação posterior das “pérolas”, por deposições de carbonatos que não chegaram a cimentá-las. Gruta Chapéu, Iporanga, E.S.P..



Foto 43 – Corte num pisóide, onde dois edifícios, que tiveram formação concomitante, soldaram-se, transformando suas seções originais circulares, de crescimento, em seção retangular. A forma exterior resultante do prosseguimento do crescimento é alongada, tipo “bastão”. Gruta do Chapéu, Iporanga, E.S.P..



Foto 44 – Pisóides com núcleos soldados, com seção alterada para retangular e forma externa para poliédrica. O edifício resultante é um "poliedro" em lugar de esfera. Gruta do Chapéu, Iporanga, E.S.P..



Foto 45 – Pisóides deformados do tipo "bastão" encontrados nas Grutas da Pescaria e Chapéu, em Iporanga, E.S.P..



Foto 46 – Pisóides deformados do tipo “poliedro”, onde a estrutura original circular ainda é visível na face cúbica, encontrados nas Grutas do Chapéu e da Pescaria, Iporanga, E.S.P..



Foto 47 – Pisóides gigantes deformados, com núcleos de aglomerados cristalinos e zonas de transição, encontrados na Gruta da Pescaria, Iporanga, E.S.P..

BIBLIOGRAFIA

- 1 – BAKER, G. & FROSTICK, A.C. – Pisoliths, oololiths and calcareous growths in limestone cave at Port Campbell, Victoria, Australia. *Journal of Sedimentary Petrology*, Tulsa, Okla., **21**: 85-104, 1951.
- 2 – BATHURST, G.C.R. – Carbonate sediments and their diagenesis. Amsterdam. Elsevier, 1971.
- 3 – BROWN, T.C. – Origin of oolite texture in rocks. Bulletin of the Geological Society of America, Boulder, Col., **25**: 745 - 780, 1918.
- 4 – BUCHER, W.C. – On oolites and spherulites. *Journal of Geology*, Chicago, III., **26**: 593-609, 1918.
- 5 – CAYEUX, L. & CAROZZI, A.V. – Carbonate rocks. Darien, Hafner, 1970.
- 6 – CHILINGAR, G.V., BISSEL, H.J. & FAIRBRIDGE, R.W. – Carbonate rocks. Amsterdam, Elsevier, 1967.
- 7 – DAVIDSON, S.C. & MACKINSTRY, H.E. – Cave pearls, oolites, and isolated inclusions in veins. *Economic Geology*, Houghton, Michigan, **26** (3): 289-294, 1931.
- 8 – DERIBERE, M. – Les perles de caverne. *La Nature*, Paris, (3055): 115-116.
- 9 – DONAHUE, J.D. – The formation of cave pearls. *Missouri Speleology*, **4**: 53-58, 1962.
- 10 – –Laboratory growth of pisolite grains. *Journal of Sedimentary Petrology*, Tulsa, Okla., **35**: 251-256, 1965.
- 11 – – Genesis of oolite and pisolite grains: an energy index. *Journal of Sedimentary Petrology*, Tulsa, Okla., **39**: 1399-1411, 1969.
- 12 – GRADZINSKI, R. & RADOMSKI, A. – Pisolits from Cuban cave. *Ann. Soc. Geol. Pologne*, **37**: 243-265., 1967.
- 13 – GUIMARÃES, J.E.P. – Ocorrencias de perolas de cavernas nas grutas de Iporanga, Estado de São Paulo. *O I.G.G.*, São Paulo, **16**: 21-30, 1963.
- 14 – HAHNE, C. & KIRCHMAYER, M. – Hohlenperlen, besonders aus bergwerken des Ruhrgebietes. *Neues Jahrbuch für Geologie und Palaontologie*, Stuttgart, Abhandl. **130**: 1-46, 1968.
- 15 – HATCH, F.H. & RASTALL, R.H. – The petrology of the sedimentary rocks. London, Allen and Unwin, 1938.

- 16 – HEES, F.L. – Oolites or cave pearls in the Carlsbad caverns. *Proceedings of the United States Natural Museum*, New York. **76** (2813): 1-5, 1929.
- 17 – KELLER, W.D. – Cave pearls in a mine near Columbia, Missouri. *Journal of Sedimentary Petrology*, Tulsa, Okla., **7**: 108-109, 1937.
- 18 – KIRCHMAYER, M. – Hohlenperlen Vorkommen. *Osterreichische Akademie der Wissenschaften, Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse*, Vienna, **10**: 223-229, 1964.
- 19 – MONAGHAN, P.H. & LYTLE, M.L. – Origin of calcareous oolites. *Bulletin of the Geological Society of America*, Boulder, Col., **65** (12): 1287, 1954.
- 20 – MOORE, G.W. & NICHOLAS, B.G. – Speleology, the study of caves. Boston, Heath, 1964.
- 21 – MURRAY, J.W. – The deposition of calcite and aragonite in caves. *Journal of Geology*, Chicago, Ill., **62**: 481-49, 1954.
- 22 – ROTHPLETZ, A. – On the formation of oolite. *American Geologist*, **10**: 279-282 (traduzido do Botan. Zentralblatt, **35**: 265-268, 1892).
- 23 – SHROCK, R.R. – Polyedral pisolites. *American Journal of Science*, New Haven, **19**: 368-372, 1930.
- 24 – SIEGEL, F.R. – Aspects of calcium carbonate deposition in Great Onyx cave, Kentucky. *Sedimentology*, Amsterdam. **4**: 285-299, 1965.
- 25 – & REAMS, M.W. – Temperature effect on precipitation of calcium carbonate from calcium bicarbonate solutions and its application to cavern environments. *Sedimentology*, Amsterdam, **7**: 241-248.
- 26 – SIFFRE, M. – Les formation pedologiques de la Grotte des Perles. *Atti del Symp. Inter. di Speleologia*, Varenna, **2**: 56-60, 1961.
- 27 – THOMAS, C. – Origin of pisolites. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, Tulsa, Okla., **49**: 360, 1965.
- 28 – TWENHOFEL, W.H. – Treatise on sedimentation. New York, McGraw, 1939.
- 29 – VAN TUYL, F.M. – A contribution to the oolite problem. *Journal of Geology*, Chicago, Ill., **24**: 792-797, 1916.