

SÍNTESE DOS PROCESSOS DE GÊNESE DE CAVIDADES EM LITOLOGIAS DE FERRO

SYNTHESIS OF CAVITIES GENESIS IN IRON FORMATION AND CORRELATES LITHOLOGIES

Georgete Dutra

Associado individual da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE 1117).

Contatos: georgeted@gmail.com.

Resumo

As cavidades cadastradas no Brasil em litologias associadas a ferro estão concentradas principalmente em Minas Gerais (Quadrilátero Ferrífero - QF) e no Pará (Carajás – CKS). As cavidades observadas ocorrem em canga, no contato canga/minério, canga/formação ferrífera, no minério e na formação ferrífera. O termo minério foi utilizado para designar uma rocha com mais de 60% de ferro e pouca ou nenhuma sílica, carbonatos ou sulfetos; o termo formação ferrífera abrange itabiritos, dolomitos ferruginosos, filitos hematíticos, jaspilitos e hematitas. Existem várias possibilidades de gênese de cavidades em litologias ferríferas, pois se trata de um assunto vasto com comentários de diversos autores. Esse artigo é uma síntese dos principais processos observados/compilados na gênese de cavidades. Os principais processos genéticos identificados são erosão, lixiviação, dissolução e biogênese. Na erosão têm-se processos específicos tais como erosão remontante, erosão por cachoeira, erosão nas margens de drenagens, erosão nas cabeceiras de drenagens, incasão de fragmentos, etc. A principal gênese identificada é a erosão no contato canga/rocha subjacente com posterior ampliação dos espaços devido a desmoronamentos. Espera-se que o artigo suscite discussões positivas de forma a elucidar a formação de cavidades em minério de ferro.

Palavras-Chave: cavidades; canga; formação ferrífera; minério; processos; gênese.

Abstract

Cavities in iron rocks and correlates lithologies are concentrated mainly in Minas Gerais (Quadrilátero Ferrífero - QF) and Pará (Carajás - CKS). The cavities occurred in canga, in contact canga / ore, canga / iron formation, in ore and iron formation. The term ore is used to designate a rock with more than 60% iron and little or no silica, carbonates or sulfides; iron formation designated itabirites, ferruginous dolomites, hematitic phyllites, jaspilitos and hematite. There are several possibilities for the genesis of banded iron cavities. It is a vast subject with comments from various authors. This article is a summary of the main processes observed / collected in the process of cavities genesis. The main genesis identified are erosion, leaching, dissolution and biogenesis. The mainly genesis is erosion in contact canga/stone (it isn't matter what the substrate rock) and subsequent fall of fragments of the ceiling. It is expected that the article raises discussions about the formation of cavities in iron rocks.

Key-words: cavities; canga; iron formation; ore; processes; genesis.

1. INTRODUÇÃO

As cavidades estudadas concentram-se em dois estados do Brasil, Minas Gerais e Pará. Em Minas Gerais situam-se na área denominada de Quadrilátero Ferrífero (QF); no Pará a área é conhecida como Carajás (CKS) (Figura 1).

O estado de Minas Gerais situa-se na região sudeste do Brasil. Possui clima tropical marcado por duas estações definidas, com média de precipitação de 1770mm/ano (médias de 2000 a 2012) distribuídos em cerca de 1550 mm de outubro a março (estação chuvosa) e 115mm de abril a setembro (estação seca).



Figura 1 – Localização das áreas de estudo.

No Quadrilátero Ferrífero as altitudes médias de 800-900m são frequentemente dominadas por linhas de cristas que ultrapassam, usualmente, a cota 1200m e, excepcionalmente, a cota 2000m como na Serra do Caraça, na borda leste. As cavidades situam-se em altitudes em torno de 1200m.

O estado do Pará possui clima equatorial a sub-equatorial com precipitação média de 1970mm/ano (médias de 2000 a 2012) distribuídos em cerca de 1580mm de novembro a abril (estação chuvosa) e 390mm de maio a outubro (estação seca).

A região da Serra dos Carajás é um complexo de serras, platôs e montanhas, fortemente entalhado pela ação de processos pluviais, desenvolvendo vales encaixados. A cota altimétrica mais elevada observada na região é de 897m acima do nível do mar (Serra Sul) e a mais baixa 150m, no Rio Itacaiúnas, com amplitude altimétrica de 747m. É comum a ocorrência de lagoas no topo dos platôs da formação ferrífera. As cavidades situam-se em altitudes em torno de 600m.

Tanto no Quadrilátero Ferrífero quanto em Carajás as maiores altitudes são encontradas em terrenos com quartzitos e cangas, devido à maior resistência que oferecem frente aos processos intempéricos.

2. METODOLOGIA

Os estudos foram realizados com base em vasta revisão da bibliografia disponível, além de observações de campo e análises morfológicas através de mapas de perfis das cavidades. Também foram utilizados dados oriundos de cadastros de nascentes para obtenção de informações geoquímicas e hidrológicas.

A metodologia envolve a base do que foi estudado para conseguir a síntese dos processos espeleogenéticos para cavidades em ferro. Assim tem-se sucintamente o contexto geológico onde as cavidades se inserem; a origem da canga; a origem do minério e as principais características das cavidades.

2.1 Contexto Geológico

• Quadrilátero Ferrífero

Afloram no Quadrilátero Ferrífero rochas metamórficas pertencentes a uma sequência metavulcanossedimentar de idade Arqueana a Proterozóica que compreende os Supergrupos Rio

das Velhas e Minas. O supergrupo Rio das Velhas consiste de sequência arqueana do tipo Greenstone Belt (Almeida, 1976 e Schorscher, 1976). As rochas supergrupo Rio das Velhas servem de embasamento para o supergrupo Minas, em contato erosivo e discordante. O supergrupo Minas corresponde a unidades metassedimentares com sequências clásticas (Grupo Caraça), química (Grupo Itabira) e química-clástica (Grupo Piracicaba).

As cavidades ocorrem na Formação Cauê do Grupo Itabira e na canga formada a partir do intemperismo desta formação. A Formação Cauê é constituída por itabiritos e minerais hematíticos, itabirito hematítico e magnetítico indiferenciados, itabiritos argilosos (ocre). O enriquecimento na formação ferrífera gerou depósitos de óxidos de ferro com até 500 metros de espessura.

• Carajás

Os depósitos de ferro da Serra dos Carajás relacionam-se à sequência metavulcanossedimentar do Grupo Grão Pará ($\pm 2,76$ Ba), Supergrupo Itacaiúnas. Esta sequência constitui-se por derrames basálticos soto e sobrepostos a jaspilitos cortados por diques e sills tardios de rocha de composição básica. Nas rochas básicas incluem-se basaltos, gabros, diabásios, etc.

Os jaspilitos constituem-se por bandas alternadas de minerais de ferro (hematita e magnetita) e de jaspe (SiO_2). A ocorrência de jaspilitos em ampla área possibilitou o desenvolvimento de regiões ricas em minério de ferro de alto teor ($> 65\% \text{ Fe}$).

Tanto no Quadrilátero Ferrífero (MG) quanto em Carajás (PA) as lateritas e cangas estão associadas aos depósitos de ferro. A laterita é caracterizada por um solo de cor vermelha, formada pela acumulação de hidróxido de ferro sobre sedimentos detríticos. A canga ocorre recobrimdo toda a área de ocorrência da formação ferrífera caracterizando-se por fragmentos de hematita, itabirito, limonita e goethita cimentados por óxido-hidróxido de ferro.

2.2 Origem da canga

De acordo com Eichler (1976), as águas pluviais podem dissolver anualmente $4,55\text{g SiO}_2/\text{m}^2$ de superfície considerando precipitação anual de chuva de 600 mm. O processo de intemperismo próximo à superfície é responsável também pela oxidação e hidratação da magnetita e, em menor

proporção, da hematita, formando a crosta laterítica (canga).

No QF tem-se o modelo de Dorr (1969) no qual a canga poderia ter-se originado a partir do ferro dissolvido no processo de intemperismo e posteriormente depositado pela evaporação da água durante as estações secas. Esta deposição geraria um cimento de ferro que possibilitou a cimentação dos detritos provenientes da desagregação das rochas da Formação Cauê.

Ainda no QF Tricart (1961, apud Varajão 1988) identificou dois tipos de cangas no Sinclinal do Gandarela; o primeiro tipo que recobre a superfície cimeira foi relacionado à idade Cretácea (35Ma), e o segundo, assentado sobre colinas internas do Sinclinal foi associado ao Plioceno (7Ma) evidenciando longo período erosivo (Lima e Salard-Chboldaef, 1981; Barbosa e Rodrigues, 1965, 1967; apud Varajão, 1988). A canga mais recente protege a canga mais antiga, de idade cretácica.

Já em Carajás, a canga estaria associada a variações climáticas, processos de alteração “in situ” com redistribuição de Al e Fe e posterior retrabalhamento. De acordo com Souza e Kotschoubey (1991) após a formação da cobertura laterítica (terciário superior?) a região de Carajás foi submetida a um soerguimento com reativação dos processos erosivos. O início da laterização da Amazônia deu-se entre Cretáceo Superior e Paleoceno (65Ma) (Vasconcelos, 1996) com máximo no Oligoceno (36Ma).

Ou seja, as cangas tanto no QF quanto em Carajás tiveram amplo período de sedimentação apresentando mais de um evento de deposição. Tais ciclos originaram as descontinuidades observadas nas cangas atualmente, muitas vezes separando períodos de deposição (fácies). Vale ressaltar que no período de deposição o clima passou por diversas fases, incluindo-se eventos de seca, chuvas, glaciações com retração e expansão de florestas, cerrados, desertos, etc., conclui-se que a história à qual a canga foi submetida é complexa com períodos de retração/expansão de vegetação e alternâncias de fases úmidas e secas (Ab’Saber, 1977; Suguio, 1999).

2.3 Origem do minério

A característica do minério de ferro é principalmente alta concentração de Fe (>64%) e praticamente ausência de sílica, alumina, fósforo,

álcalis, etc. Rosiere e Chemale (2001) definiram três tipos principais de minérios no QF:

- não tectônicos (hipogênicos ou supergênicos) sendo a característica a concordância com o bandamento; presença de dobras convolutas, deslizamentos, interstícios, lixiviação de minerais sem grandes alterações na estrutura da rocha etc. Idade provável no QF de 2.4 a 2.0 Ga (Rosiere e Chemale, 2001).
- sin-tectônicos (hipogênicos) com condicionamento genético à estrutura tectônica;
- pós-tectônicos (supergênicos) – onde a estrutura favorece o crescimento da mineralização mas não há condicionamento genético.

Beisiegel *et al.* (1973) propõem para os minérios friáveis, enriquecimento supergênico. Esta origem também é defendida por Dardenne e Schobbenhaus (2001), para os quais o minério formou-se pela atuação dos mecanismos de alteração laterítica que provocaram dessilicificação (lixiviação supergênica da sílica) dos jaspilitos e uma concentração residual da hematita.

A origem destes minérios é controversa com diversos modelos que tentam explicá-los. A hipótese mais aceita atualmente associa a origem do minério a fluidos mineralizantes. Estes fluidos poderiam ser de origem hidrotermal ou hipogênicos provenientes de corpos magmáticos (Gruner, 1924, 1930, 1937; Dorr 1965, 1969; Guild 1953, 1957 in Rosiere e Chemale – 2001).

O enriquecimento supergênico no Q.F. provavelmente iniciou-se no ciclo de erosão Sulamericano (King, 1956) de acordo com Eichler (1976) e foi condicionado pelo rebaixamento do nível de água (Barbosa 1965, Varajão 1991, Gorceix 1884) auxiliado pela estruturação das formações ferríferas e pela ação de atividade tectônica recente (Saadi, 1993). Estruturas planares e lineares permitem uma percolação mais efetiva induzindo um enriquecimento mais rápido. Mais recentemente, segundo Morris (1985), o modelo supergênico refere-se ao enriquecimento de ferro a partir da infiltração, ainda no Pré-Cambriano, de águas meteóricas oxidadas. Neste modelo os minerais de ganga seriam substituídos por hidróxidos com carreamento do ferro de porções superficiais para níveis mais profundos. Admite-se que a sílica lixiviada seria liberada para as drenagens sob a forma de H_4SiO_4 .

O modelo hipogênico, defendido em especial por Taylor *et al.* (2001), sustenta que em um primeiro estágio houve a remoção de sílica da rocha

por fluidos hidrotermais, deixando um resíduo enriquecido em óxidos de ferro, carbonato, silicatos de magnésio e apatita. Os estágios subsequentes, de natureza supergênica, promoveram a dissolução do carbonato, fósforo e magnésio e geração de minério hematítico poroso de alto teor. Os dois modelos, mas em especial o hipogênico, atribui um papel relevante aos falhamentos como planos condutores aos fluidos.

A redução de volume das formações ferríferas bandadas decorrente do processo de enriquecimento em ferro, pela remoção da ganga, é destacado tanto por Morris (2002) que calcula um adelgaçamento do pacote sedimentar entre 32 e 36%, quanto por Taylor *et al.* (2001) que prevê valor de 40%. O conseqüente aumento da porosidade, com variação de 6% no protolito a 30% na hematita porosa de alto teor, foi demonstrado por Taylor *et al.* (2001).

2.4 Características principais das cavidades

Embora existam diferenças mineralógicas entre as formações ferríferas e cangas que ocorrem tanto no Q.F. quanto em CKS, as cavidades em ambas as localidades apresentam o mesmo tipo de ocorrência.

De acordo com Piló e Auler (2009) as cavidades possuem três posicionamentos principais: podem situar-se na borda de lagoas; nas cabeceiras e borda de drenagens e nas bordas dos platôs, incluindo-se a alta, média e baixa vertente. Geralmente as cavidades localizam-se na quebra do

relevo, seja internamente ou externamente ao platô de canga.

As cavidades ferruginosas são conhecidas pelas suas entradas estreitas nas bordas de canga devido a processos erosivos, ou pequenas entradas verticais onde o manto da canga sofre um colapso sobre parte de um conduto ocluso gerando assim uma entrada (Simmons, 1963).

Também é característica marcante o perfil em ascendente seguindo grosseiramente o relevo; ausência de fluxos de água; paredes rugosas, desmoronamentos e/ou deslocamento formando salões; quase todas as cavidades apresentam muitos fragmentos rochosos no piso.

As cavidades possuem padrões lineares ou câmaras irregulares (Piló e Auler, 2009) ou a mistura de ambos (Figura 2). O padrão linear caracteriza-se por uma direção principal de desenvolvimento, podendo estar associado a uma feição estrutural marcante. O padrão câmaras irregulares caracteriza-se por salões interconectados por passagens estreitas.

As cavidades com câmaras irregulares não parecem apresentar um lineamento principal. Infere-se que muitas das cavidades consideradas irregulares são na realidade cavidades lineares onde ocorreram junção e alargamento das feições. Prova disso são as passagens estreitas conectando os condutos; mais de uma direção de condutos e passagens; condutos paralelos ou semi-paralelos mostrando condicionamento estrutural.



Figura 2 – Padrões de cavidades em litologias de ferro. Direita - linear; centro – câmaras irregulares; esquerda – mistura.

3. DISCUSSÕES: GÊNESE DAS CAVIDADES

Com base nos dados expostos acima apresenta-se a seguir os principais processos envolvidos na gênese de cavidades. Na maioria dos trabalhos consultados os processos espeleogenéticos são apenas citados, não revelando detalhes sobre seu funcionamento. Nesta síntese tenta-se descrever os principais mecanismos que contribuem para a gênese e evolução de cavidades em litologias associadas a ferro.

3.1 Erosão

“Cavidades de erosão ocorrem imediatamente abaixo de mantos de canga que suportam bordas de vales. A erosão de material friável sob o manto de canga inconsolidada se inicia logo que uma drenagem rompe a camada de canga, formando um vale de encostas íngremes. Quando a inclinação da encosta do vale é acentuada, a rocha intemperizada e o material detrítico não cimentado são rolados encosta abaixo, criando pequenas cavidades. Depois de formadas as cavidades podem ser alargadas pela ação abrasiva de um curso d’água (Simmons, G.C. – USGS 1963).”

Maurity (1995) infere que as grutas no platô de N1 estão situadas na interface saprolito/crosta. As feições pseudocársticas teriam condicionamento estrutural; a evolução dependeria da resistência da canga: em locais onde a canga era resistente formou-se salões e galerias pela ação erosiva das águas; em locais de crosta instável esta cedeu podendo formar as lagoas. Nas grutas o abatimento de blocos do teto faz parte do processo de desenvolvimento destas.

De acordo com Piló e Auler (2009) a zona de contato canga/minério de ferro favorece a espeleogênese. Ainda segundo estes autores as cavidades exclusivas de canga parecem ser controladas pela variação de fácies.

• Erosão em cabeceiras de drenagens

Este parece ser o principal processo de formação das cavidades de contato. Neste caso estamos falando de erosões sub-superficiais geradas em terrenos com alto a médio gradiente (inclinação). As águas possuem alta energia garantindo a erosão mecânica das rochas (Figura 3). Se pegarmos um mapa topográfico podemos identificar as cabeceiras de drenagens com a forma de “leques” ou seja, um

escoamento difuso que posteriormente forma um canal onde há concentração das águas.

Vann (1963) e Moss (1965) observaram que nascentes situadas abaixo das crostas lateríticas favorecem a erosão. Esta retirada de material pode gerar cavidades em locais mais vulneráveis. No QF e em CKS foram registradas diversas nascentes sazonais no contato canga/rocha. Estas nascentes possuíam invariavelmente um canal de pequeno diâmetro (<10 cm) de onde a água surgia (Dutra, 2005, 2006, 2007, 2008).

O processo relaciona-se ao fluxo em túneis com diâmetro inferior a 1cm de diâmetro. Nestes casos, o fluxo turbulento favorece a erosão mecânica através da desagregação da rocha. Este processo pode originar canalículos que progridem à montante. A parte de jusante erode com maior intensidade aumentando o diâmetro. A canga sendo mais resistente permanece, mas o substrato friável é removido neste processo. Este substrato pode ser composto por hematitas ou formações ferríferas friáveis, solo ou mesmo minério menos resistente que a canga. Com a continuidade do processo ocorrem pequenos desmoronamentos nas laterais e por vezes, teto, sendo o material carregado pelas águas. Ressalte-se que este processo ocorre principalmente no período chuvoso.

Com o desenvolvimento do processo pode ocorrer a junção entre cavidades próximas, sendo que em alguns casos a erosão remontante nos canalículos condiciona a captura de um conduto por outro, de forma análoga ao que ocorre em superfície nas redes hidrográficas. Ressalte-se que nos terrenos de canga só não ocorre o voçorocamento devido à alta resistividade desta ao escoamento superficial; mas a incisão do canal pode ter originado as cavidades.

Neste caso se ocorrer nascentes, estas são temporárias relacionadas ao fluxo hipodérmico com infiltração de águas pluviais à montante desencadeando erosão e formando pequenos túneis.

Características: alta a média declividade das vertentes; desenvolve-se de cima para baixo; existência de um ou mais pontos onde as águas pluviais infiltram; perfil das cavidades acompanha o contato canga/rocha e, invariavelmente, o relevo.

• Erosão remontante

A erosão remontante ocorre quando o nível de água intercepta a superfície do terreno, formando uma nascente. Salienta-se que, para ocorrer erosão remontante tem que haver uma nascente; mas, como dito anteriormente, a maioria das cavidades estão

secas, ou seja, não há interseção com o nível de água subterrânea.

Na erosão remontante a escavação é de baixo para cima acompanhando o nível de água. Assim as porções superiores seriam mais antigas e as inferiores mais recentes.

Características: presença de nascentes; desenvolve-se de baixo para cima acompanhando o nível de água.

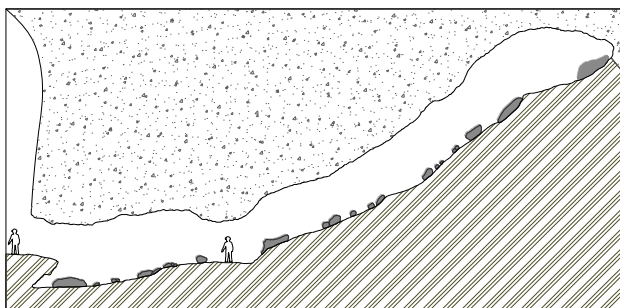


Figura 3 – Exemplo de perfil de cavidade em contato canga/minério onde pode ter ocorrido erosão em cabeceira de drenagem.

• Erosão por cachoeira

É um caso de erosão remontante, onde o fluxo de água superficial escoar através do terreno caindo de desníveis abruptos. Nesta queda, a energia potencial das águas possui grande poder erosivo desagregando as rochas abaixo. Com a continuidade do processo tem-se a formação de uma “marquise” de canga, podendo caracterizar uma reentrância na rocha. Geralmente formam-se abrigos neste caso (Figura 4).

Características: acompanha o relevo, presença de fragmentos de rocha na entrada (desabamentos do teto), desenvolve-se a partir da entrada.

• Erosão nas margens de drenagens

Neste caso ocorre erosão mecânica que provoca solapamento das margens e consequente desmoronamento do material sobrejacente. A erosão ocorre principalmente na época de chuvas, em curvas de rios formando abrigos ao longo das margens de drenagens. A altura da abertura pode correlacionar-se com a altura do nível de água nas drenagens na época de chuvas.

Características: longa abertura, pouca profundidade, pouca altura, desenvolve-se a partir do exterior.

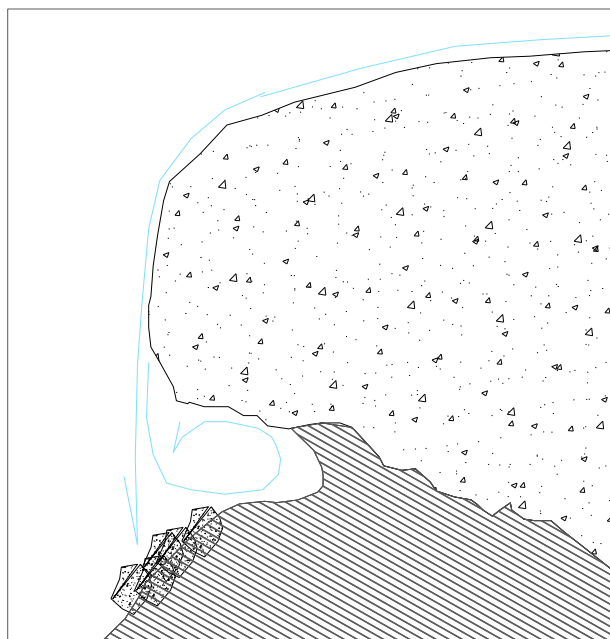


Figura 4 – Exemplo de perfil de cavidade em contato canga/minério onde pode ter ocorrido erosão em cabeceira de drenagem.

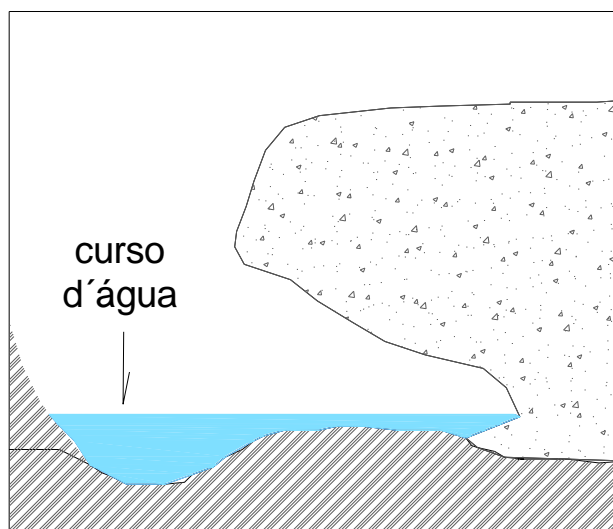


Figura 5 – Exemplo de perfil de cavidade em contato canga/minério onde pode ter ocorrido erosão nas bordas da drenagem.

• Erosão em bordas de lagoas

Em cavidades situadas às margens de lagoas estas podem contribuir para sua gênese / evolução. Neste caso é de se esperar uma maior amplitude da cavidade na linha de água devido à erosão/oxidação das paredes. O perfil da entrada seria lenticular horizontal.

• Gênese / Ampliação devido a desabamentos

Somente analisando os mapas de diversas cavidades em litologias ferríferas percebe-se uma característica comum – grande parte das cavidades possuem fragmentos rochosos no piso indicando queda de blocos.

Os fragmentos são angulosos indicando pouco ou nenhum transporte, tamanho e forma variados, podendo ser constituídos por cangas ou hematitas.

Os processos podem ser antigos ou recentes, há fragmentos e ou pilhas de fragmentos cimentados no piso por crosta de ferro indicando processos antigos e sobre a crosta há fragmentos soltos podendo indicar processos recentes ou, pelo menos, mais recentes que os cimentados.

• Depósito de tálus

Cavidades formadas em tálus podem ocorrer em diversas litologias. Geralmente tem-se que ter energia potencial para a formação deste tipo de cavidade, com uma área fonte topograficamente superior à cavidade. Se considerarmos que as litologias ferríferas geralmente situam-se em cotas altimétricas elevadas em comparação ao terreno nos arredores pode-se deduzir que tem-se cavidades em depósito de tálus.

É comum a ocorrência de cachoeiras sazonais ou perenes nas quebras do relevo; desta forma é comum também a queda de grandes fragmentos de rocha das partes superiores formando o depósito nas partes baixas. Estes fragmentos empilhados podem formar cavidades e abrigos.

3.2 Lixiviação

A porosidade intergranular resulta da lixiviação do quartzo ou carbonato em solução, por processos de alteração supergênica. Este processo de lixiviação envolve lenta corrosão (Varajão *et al.* 1996a, b, 200b) proporcionando a quebra da estrutura da rocha tornando-a friável.

Em estágios avançados de intemperismo, o quartzo e o carbonato podem ser totalmente

extraídos da rocha, o que envolve redução de 30 a 40% do volume original (Varajão *et al.* 2000; Taylor *et al.*, 2001; Morris, 2002); a isto acrescentam-se acomodações gravimétricas e geração de porosidade residual entre 29% e 37% (Ribeiro, 2003).

Já o ferro praticamente não sofre lixiviação, permanecendo no perfil de intemperismo na forma de plamas hematíticos ou goethíticos que por sua vez preenche vazios deixados pela alteração supergênica (Rosiere e Chemale, 2001). Infere-se que estes plamas hematíticos ou goethíticos podem originar também parte das carapaças ou crostas encontradas em algumas cavidades.

De acordo com Piló e Auler, 2009, existiriam cavidades em Carajás que estariam relacionadas aos processos de mineralização da formação ferrífera – denominadas por eles de cavernas “minerogênicas”.

Neste caso as cavidades relacionadas à gênese do minério (lixiviação) são muito antigas e na maioria das vezes não teriam acesso. Poderiam ser oriundas das acomodações gravimétricas gerando vazios, alguns podendo chegar a metros.

3.3 Dissolução

De acordo com Carmo *et al.*, no Vale do Rio Peixe Bravo (MG), a maioria das cavidades nesta região desenvolvem-se principalmente no contato canga/diamictito hematítico e apresentam feições de dissolução.

Ressalte-se que estas litologias, de acordo com Vilela (1983, in Carmo 2011), constituem-se: “predominantemente por diamictitos hematíticos, quartzitos hematíticos e xistos hematíticos subordinados. Segundo Vilela *et al.* (1983), os diamictitos hematíticos, que constituem o minério de ferro, apresentam bandejamento e são formados por leitos de quartzo contendo cristais de hematita, que se alternam com leitos de hematita associada à sericita e clorita. Grande parte de toda essa sequência de litotipos hematíticos está sob uma extensa cobertura de canga, que frequentemente atinge cerca de 30 m de espessura. Superficialmente, as cangas apresentam fragmentos detríticos de minério rico e são compostas geralmente por limonita pura (Vilela, 1983).”

O processo de dissolução depende do pH. Segundo a representação de Mason (1966 – Figura 6) observa-se que os silicatos são solúveis no meio básico e pouco solúvel em meio ácido; já a alumina é extremamente solúvel entre o pH 4 e 5 e

novamente entre o pH 9 e 10. Ora, nas diversas amostragens em nascentes e poços tubulares associados à formação ferrífera, tanto em Carajás quanto no Quadrilátero Ferrífero tem-se pH das águas em torno de 5 (Dutra, 2005, 2006, 2007, 2008). As análises físico-químicas das águas não resultaram em quantidades anômalas de ferro ou sílica. Ou seja, não é a dissolução a principal reação na gênese das cavidades em litologias ferríferas.

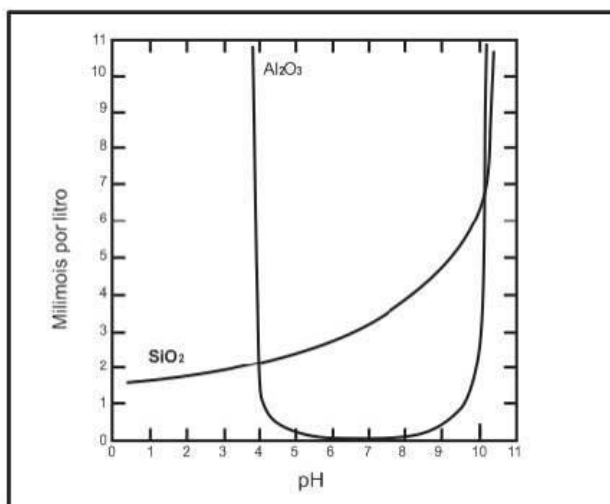


Figura 6 – Solubilidade Si e AL X pH (Mason, 1966).

Neste caso a dissolução não ocorre em itabiritos ou na formação ferrífera. E a erosão mecânica parece ser mais importante que a dissolução.

3.4 Biogênese / Ampliação

Por enquanto, relaciona-se dois tipos de contribuição da biota à formação/ampliação das cavidades em litologias ferríferas.

As paleotocas geradas e/ou ampliadas por tatus, preguiças gigantes ou outros animais; este tipo de gênese relaciona-se mais a cavidades em rocha máfica decomposta recoberta por canga de canga ou canga química. A rocha ou saprolito tem que ser friável e relativamente “mole” para que a fauna pleistocênica conseguisse escavar (Figura 7 - esquerda).

Outra forma seria a erosão mecânica intensificada por raízes de plantas, que aproveitam discontinuidades nas rochas e penetram por entre bandamentos e fissuras forçando a passagem e posteriormente favorecendo a quebra da rocha (Figura 7 – direita).

4. CONCLUSÕES

Inicialmente vale a pena lembrar que a canga é bem mais recente que a formação ferrífera, e também é bem mais recente que os depósitos de minério de ferro. Ou seja, até o relevo ser recoberto pela canga, este sofreu vários milhões de anos de intemperismo. Desta forma seria possível ter-se formado um solo ou uma rocha decomposta a semi-decomposta que posteriormente foi recoberta pela canga. A própria formação da canga já auxiliaria na modificação (intemperismo) do substrato.

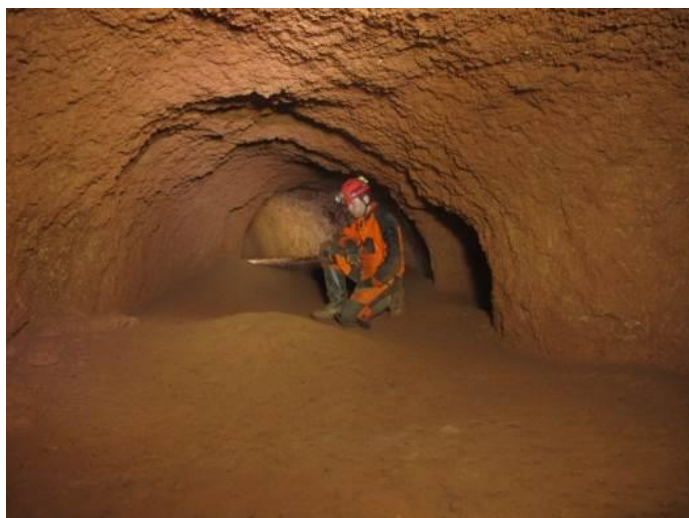


Figura 7 – Esquerda – paleotoca; direita – raízes dentro de cavidade.

Ainda há muitas dúvidas sobre a formação de cavidades em minério de ferro, mas também há alguns pontos já elucidados. A maioria das cavidades ocorre na canga e no contato canga/rocha; o processo predominante para formação das cavidades parece ser a erosão por drenagem temporária subsuperficial. Obtido o alargamento inicial, as cavidades parecem evoluir através de incasões/abatimentos. Estas cavidades possuem idade pós-Terciário Inferior (formação das cangas) e não estão relacionadas ao aquífero.

Existem ainda algumas cavidades relacionadas à lixiviação, mas provavelmente não à gênese do minério devido à idade da mineralização. Há ainda as cavidades associadas à dissolução, neste caso, principalmente nos itabiritos dolomíticos.

Independente do tipo de gênese podem ocorrer ampliação das cavidades devido à incasão de fragmentos, escavações da megafauna do pleistoceno e/ ou erosões diversas.

O processo de incasão ocorre em quase todas as cavidades, como pode ser observado pela presença constante de fragmentos no piso.

Ainda ocorrem muitas dúvidas. Deve-se ter em mente a idade da canga e do minério. Seriam as cavidades tão antigas quanto à formação do minério

e da canga ou estariam relacionadas a eventos mais recentes, como, por exemplo, a glaciação?

Sabe-se que no Pleistoceno (2,5Ma) ocorreram oscilações climáticas devido à glaciação com alternâncias de clima úmido para condições áridas a semiáridas. Estudos palinológicos na região da Serra de Carajás indicam que houve quatro fases de retração da floresta amazônica, há 60.000, 40.000, 23.000 e 11.000 anos, indicando momentos de clima mais seco. Já entre 9.500 e 8.000 há indícios de expansão da floresta equatorial, indicando clima mais úmido que o atual (Suguio, 1999). As cavidades já teriam sido formadas nesta época ou estas variações auxiliaram na gênese/desenvolvimento? Afinal, qual seria a idade das cavidades de ferro e/ou canga? Seriam possíveis cavidades de 2,0 Ba?

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à VALE na pessoa do Iuri Brandi pela oportunidade de conhecer e estudar as cavidades inclusive realizando os estudos de dinâmica hídrica destas e seu monitoramento. Ao Rogério Dell Antonio, Pierre Munaro e Fernando Frigo pela revisão crítica do texto e auxílio/discussões.

BIBLIOGRAFIA

- AB'SABER, A. N. Espaços ocupados pela expansão dos climas secos na América do Sul por ocasião dos períodos glaciais Quaternários. **Paleoclimas** (3). São Paulo. 1977.
- AB'SABER, A. N. Um conceito de geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o Quaternário. **Geomorfologia**. n. 18, IG-USP, S. Paulo, 1969.
- ALMEIDA, F. F. M. O Cráton São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, n. 4, p.349-364, 1977.
- ATZINGEN, N.; CRESCENCIO, G.; CUNHA JR., W. R. Estudos espeleológicos na serra dos Carajás, município de Parauapebas-PA. **Boletim Técnico**, n.4, p.51-73, 2009.
- BARBOSA, G. V.; RODRIGUES, D. M. S. O Quadrilátero Ferrífero e seus problemas geomorfológicos. **Boletim Mineiro de Geografia**, v. 10/11, p.3-35, 1965.
- BEISIEGEL, V. R.; BERNARDELLI, A. L.; DRUMM, N. F.; RIFF, A. W.; TREMAINE, J. W. Geologia e Recursos Minerais da Serra dos Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 3, p. 215-242, 1973.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. V. I e II. Editora da UFSC, Florianópolis, 1996.
- BUCHMANN, F. S.; CARON, F.; LOPES, R. P. Traços fósseis (paleotocas e crotovinas) da megafauna extinta no Rio grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v.12, n.3, p. 247-256, 2009.

- CARMO, F. F.; CARMO, F. F.; SALGADO, A. A. R.; JACOBI, C. M. Novo sítio espeleológico em sistemas ferruginosos, no vale do rio Peixe Bravo, norte de Minas Gerais, Brasil. **Espeleo-Tema**. v.22, n.1, p.25-38, 2011.
- CECAV. Base de dados. Brasília, CECAV, 2011. Disponível em: <www.icmbio.gov.br/cecav>. Acesso em: set. 2012.
- CUNHA JR., W. R.; ATZINGEN, N.; CRESCENCIO, G. Estudos espeleológicos na serra dos Carajá, município de Parauapebas-PA. Congresso Brasileiro de Espeleologia, 29, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: SBE/SEE. p.97-103, 2007.
- DARDENNE, M. A.; SCHOBENHAUS, C. Depósitos minerais no tempo geológico e épocas metalogênicas. In **Geologia, Tectônica e Recursos minerais do Brasil**, CPRM, Brasília, p.365-378, 2001.
- DORR, J. V. N. Nature and origin of the high grade hematite ores of Minas Gerais Brazil. **Economic Geology**, 60:1-46, 1965.
- DORR, J. V. N. Physiographic, stratigraphic and structural development of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **USGS Professional Paper**, 641-A. Washington. 110 p. 1969.
- DUTRA, G. M. **Cadastro de nascentes do manganês do Azul. Características das águas de nascentes, drenagens e poços tubulares. Modelo conceitual e Matemático do fluxo de águas do aquífero.** VALE / MDGEO. Relatório Interno. 2005.
- DUTRA, G. M. **Cadastro de nascentes da Serra Norte. Características das águas de nascentes, drenagens e poços tubulares. Modelo conceitual do fluxo de águas das minas de N4 e N5. Modelo matemático operacional da mina de N5E.** VALE / MDGEO. Relatório Interno. 2006.
- DUTRA, G. M. **Cadastro de nascentes do Serra Sul. Características das águas de nascentes, drenagens e poços tubulares. Modelo conceitual de águas da Serra Sul.** VALE / MDGEO. Relatório Interno. 2007.
- DUTRA, G. M. **Cadastro de nascentes do Serra Leste. Características das águas de nascentes, drenagens e poços tubulares. Modelo conceitual e matemático do fluxo de águas da Serra Leste.** VALE / MDGEO. Relatório Interno. 2008.
- EICHLER, J. Origin of the Precambrian Iron Formation. In: Wolf K.H. (ed.) **Handbook of strataboud and stratification ore deposits**. New York, Elsevier, p. 157-201. 1976.
- FAIRBRIDGE, R. W. Eustatic changes in sea level. In: **Physics and chemistry of the Earth**. Vol. 4, p. 99-185, 1961.
- FERREIRA, R. L. A vida subterrânea nos campos ferruginosos. **O Carste**, v.17, n.3, p.106-115, 2005.
- GORCEIX, H. Bacia Terciária d'água doce nos arredores de Ouro Preto (Gandarela e Fonseca), Minas Geraes - Brasil. **Anais da Escola de Minas**, 3: 75-92. 1884.
- KING, L. C. A geomorfologia do Brasil Oriental. **Revista Brasileira de Geografia** 2: 147-265. 1956.
- LIMA, M. R.; SALARD-CHEBOLDIAEFF, M. Palynologie dès bassins de Gandarela et Fonseca (Eocène de Fétat de Minas Gerais). **Boi IG-USP**, 12:33-54. 1981.
- MASON, B. **Principles of geochemistry**. 3. Ed. New York:Wiley, 1966.

- MAURITY, C. W.; KOTSCHOUBEY, B. Pseudokarst Features in the Lateritic Cover of Serra dos Carajás - Pará State, Brazil. 13th International Congress of Speleology 4th Speleological Congress of Latin América and Caribbean 26th Brazilian Congress of Speleology. SPELEO BRAZIL 2001. **Anais...** Brasília DF, 15-22 de julho de 2001.
- MAURITY, C. W. **Evolução recente da cobertura de alteração no Platô N1 Serra dos Carajás.** Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1995. 95p. Tese mestrado em geoquímica.UFPA. 1995.
- MORRIS, R. C. Genesis of iron ore in banded iron-formation by supergene and supergene-metamorphic processes—a conceptual model, in Wolf, K. H., ed., **Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits:** Amsterdam, Elsevier, v. 13, p. 73–235. 1985.
- MOSS, R. P. Slope development and soil morphology in a part of SW Nigria. **Journal of Soil Sciences**, 16:192-209. 1965.
- PILÓ L. B.; AULER A. S. Cavidades em minério de ferro e canga de Capão Xavier, Quadrilátero Ferrífero, MG. **O Carste**, v.17, n.3, p.92-105, 2005.
- PILÓ, L. B.; AULER, A. Geoespeleologia das cavidades em rochas ferríferas da região de Carajás, PA. Congresso Brasileiro de Espeleologia, 30, Montes Claros. **Anais...** Montes Claros: SBE, p.181-186, 2009.
- PINHEIRO, R. V. L.; MAURITY, C. W. As cavidades em rochas intempéricas da Serra dos Carajás Brasil. Congresso de Espeleologia da América Latina e do Caribe. 1, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBE, p.179-186, 1988.
- RIBEIRO, D. T. **Enriquecimento supergênico de formações ferríferas bandadas: estruturas de colapso e desordem.** 123 p. 2003:
- ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE, F., Jr. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero – uma visão geral e discussão. **Geonomos**, 8(2): 27-43. 2001.
- SAADI, A. Neotectônica da Plataforma Brasileira: esboço e interpretação preliminares. **Geonomos** 1(1): 1-15, Belo Horizonte. 1993.
- SALGADO, A. A. R.; COLIN, F.; NALINI JR., H. A.; BRAUCHER, R.; VARAJÃO, A. F. D. C.; VARAJÃO, C. A. C. O papel da denudação geoquímica no processo de erosão diferencial no Quadrilátero Ferrífero. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 5:55-69, 2004.
- SCHORSCHER, J. H. D. Komatiitos na estrutura “Greenstone belt”, Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, Recife, 1978. **Resumos...** Recife, SBG, p.292-293. 1978.
- SIMMONS, G. C. Canga Caves in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **O Carste**, v.17, n.3, p.74-77, 2005. 1963.
- SOUZA, C. I. J.; KOTSCHOUBEY, B. Alguns aspectos micromorfológicos e gênese da cobertura residual sobre rochas sedimentares da aba norte da serra dos carajás, Pará. In: Simp. Geol. Amaz., 3, Belem, **Anais...**, SBG/NN v.1. p.569-583. 1991.
- SPIER, C. A. **Geoquímica e gênese das formações ferríferas bandadas e do minério de ferro da mina de Águas Claras, Quadrilátero Ferrífero, MG.** 298 f. Tese (Doutorado) -Instituto de Geociências, USP, São Paulo. 2005.

- SUGUIO, K. Recent Progress in Quaternary Geology of Brazil. **Episodes**. Ottawa, v.22, n.3, p.217-220, 1999.
- TAYLOR, D.; DALSTRA, H. J.; HARDING, A. E.; BROADBENT, G. C.; BARLEY, M. E; Genesis of High-Grade Hematite Orebodies of the Hamersley Province, Western Australia. **Economic Geology**, July 2001, v. 96, p.837-873, 2001.
- TOLBERT, G. E.; TREMAINE, J. W.; MELCHER, G. C.; GOMES, C. B. The recently discovered serra dos Carajás iron deposits, Northern Brazil. **Economic Geology**, 66: 985-994, 1971.
- TRICART, J. Lê modele du Quadrilátero Ferrífero au sud de Belo Horizonte. Brésil. **Anu. Geographiie**, 379:255-272. 1961.
- VANN, J. H. Developmental processes in laterite terrains in Amapá. **Geogr. Rev.** 53:406-417. 1963.
- VARAJÃO, C. A. C. A questão da correlação das superfícies de erosão do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.21 p.138-145, 1991.
- VARAJÃO, C. A. C.; COLIN, F.; VIEILLARD, P.; MELFI, A. J. & NAHON, D. Early weathering of palladium gold under lateritic conditions, Maquiné Mine, Minas Gerais, Brazil. **Applied Geochemistry**, 15:245-263, 2000b.
- VARAJÃO; C. A. C.; RAMANAIDOU, E.; MELFI, A. J.; COLIN, F.; NAHON, D. Alteração dos Itabiritos da Mina de Maquiné (Quadrilátero Ferrífero): Um exemplo de alteração isalterítica In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39., Salvador, 1996. **Anais...** Salvador, Sociedade Brasileira de Geologia, 1996a. p.171-173.
- VARAJÃO, C. A. C.; RAMANAIDOU, E.; MELFI, A. J.; COLIN, F.; NAHON, D. Martitização: Alteração supergênica da magnetita.. **Revista da Escola de Minas**, 50:18-20, 1996b.
- VASCONCELOS, P. M. Paleoclimas e evolução geomorfológica da região de Carajás: evidência geoquímica e geocronológica. In: SBG/NO, Simp. Geol. Amaz., 5. Belém, **Anais...**, 26-30. 1996.
- VILELA, O. V.; SANTOS, O. M. Dados preliminares sobre o depósito de minério de ferro da Serra da Serpentina, Conceição do Mato Dentro, MG, Brasil. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 1983. Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBG/MG, p. 333-346, 1983.
- ZAVAGLIA, G. **Condicionantes geológicas do comportamento dos minérios de ferro do depósito de Tamanduá (MG) no processo metalúrgico de redução direta**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 200p. 1995.