

### Mineração náutica: nódulos e crostas polimetálicas

Atualmente, a exploração de recursos naturais preciosos por meio do processo de mineração é uma das atividades econômicas de maior importância, no caso do Brasil, representando no ano de 2020, 2,5% do PIB, de acordo com Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2021). Assim, as indústrias de mineração prosperam por meio do processo da extração de minérios, alavancando a economia e gerando milhares de empregos. Minérios como ouro, ferro, cobre, prata são importantíssimos para o desenvolvimento e sobrevivência humana e são achados e explorados majoritariamente na superfície terrestre. No entanto, é possível também achar e extrair minérios em abundância no fundo do oceano.

As principais fontes de minério do fundo do mar são os chamados nódulos ou crostas polimetálicas (Figura 1), também podendo ser chamados de nódulos e crostas de ferromanganês ou crostas cobaltíferas. Tais estruturas químico-geológicas estão localizadas em setores oceânicos entre 400 e 6.000m de profundidade, normalmente no Atlântico e nas águas polares; ainda assim, as informações de localização sobre estes metais são pouco conhecidas, principalmente, em relação às crostas.



**Figura 1.** Na esquerda, um nódulo polimetálico. Na direita, uma crosta polimetálica.



**Figura 2.** Figura ilustrativa da distribuição de nódulos e crostas pelos oceanos do mundo.

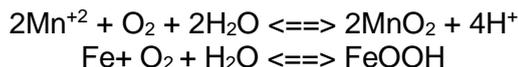
Esses minérios são comumente formados em flancos, cordilheiras, planaltos e colinas abissais (conjuntos de pequenas elevações que podem atingir até 1000m), desenvolvendo-se em áreas de águas frias e onde correntes oceânicas mantiveram-nas livres ou com pouca sedimentação. Pode-se observar na Figura 2 que os nódulos são achados em abundância em regiões como a Clarion Clipperton Zone (CCZ), localizada no centro-norte do Oceano Pacífico, na Bacia do Peru no sudeste do Pacífico e na região central do Oceano Índico

ao Norte. Já as crostas, normalmente são encontradas em regiões como o Pacífico, principalmente na área central e na área equatorial ocidental, devido à presença de montes marítimos nesta região em comparação ao Atlântico e Índico.

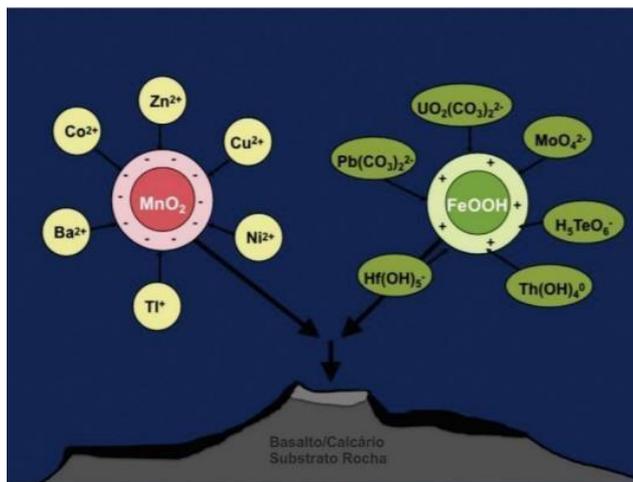
Os nódulos e crostas polimetálicas são fontes de grandes quantidades de ferro ou/ferro e manganês e outros elementos químicos, como Cu (cobre), Ni (Níquel), Co (Cobalto), Ti (Titânio), Mo (Molibdênio), Li (Lítio), Te (Telúrio), Bi (Bismuto) e Zn (Zinco). A mais evidente diferença entre as crostas e os nódulos são a diferença de tamanho, sendo as crostas maiores que os nódulos; e o fato de que os nódulos tendem a ter maior concentração percentual de Co, enquanto as crostas são ricas de outros elementos, como Ni e Cu, por exemplo. Porém, ambos (crostas e nódulos) apresentam quantidades de Ni, Cu e Co, apesar de em teores diferentes.

Para a geração destes compostos, se espera um ambiente com alto potencial oxirredutivo, que permita a reação de oxirredução, gerando a precipitação de óxidos e hidróxidos de Fe e Mn. Normalmente, tais minérios são oriundos de uma carga de rios, com sedimentos terrestres (terrígenos) e a ação de fontes hidrotermais de atividade vulcânica submarina. Por conta disso,

ocorre a precipitação do  $\text{Fe}^{2+}$  primeiro, devido a sua sensibilidade com o pH, permitindo que o  $\text{Mn}^{2+}$  oxide, precipitando como  $\text{Mn}^{4+}$ .



As formações dos nódulos e crostas polimetálicas se dão em meios de fluidos aquosos conhecidos como hidrogenético e diagenética. A mais comum em meio ao oceano é a precipitação hidrogênica (em meio hidrogenético), em que as crostas são formadas em regiões de chapas ou edifícios vulcânicos, enquanto os nódulos ocorrem em planícies abissais, como já mencionado – entre 4.000 e 6.500 m - cobertas com pouca sedimentação. Nesse processo, a acumulação de metais em nódulos e nas crostas, que se encontram em solução em pequenas partículas, se dá diretamente na água do mar, o que ocasiona a aglomeração direta de Fe e Mn nas crostas (Figura 3) e nos nódulos – sem a participação de sedimentos - forçando sua precipitação. Assim, íons de carga positiva de outros metais são sorvidos pela superfície negativa do  $\text{MnO}_2$ . O mesmo ocorre com o  $\text{FeOOH}$ , de superfície positiva, que sorve íons de metais de carga negativa ao redor.



**Figura 3.** Ilustração eletroquímica do processo hidrogenético de formação de crostas no substrato duro.

Em relação ao processo de diagênese, o qual depende totalmente de fatores biológicos, os nódulos precipitam em planaltos oceânicos e nas planícies abissais; não se possui muitas informações acerca das crostas em meio ao processo diagenético, visto que, em sua grande maioria, as crostas formam-se por processos hidrogênicos.

Sobre os nódulos, existe uma grande diversidade entre as propriedades químicas deste polimetal. Isso é devido ao fato que existem diversos fatores que influenciam sua formação, como localização, formato do relevo, a idade e a natureza do substrato e dos próprios nódulos e a quantidade de metais disponíveis.

Os nódulos apresentam cores castanhas se com alta concentração ferrífera ou preto-azulada, caso tenham alta concentração manganíferas. No exterior, podem apresentar diversas formas: majoritariamente, os nódulos são encontrados na forma de pelota, porém, podem ser irregulares, alongadas ou tabulares. A densidade aparente destes nódulos é de  $1,35 \text{ g.cm}^{-3}$ , enquanto a porosidade é em cerca de 60%, preenchendo os nódulos entre 50-60% por água e são muito friáveis (ou seja, se desagregam naturalmente ou de forma facilitada); a dureza varia de 2,1-3,19 Mohs.

Além disso, ocorre uma variação entre a cristalização dos nódulos conforme os óxidos de Fe, sendo a goethita mais comum. Já os óxidos de Mn se apresentam nas mais variadas cristalizações como (ordem crescente de cristalização) a todoroquita ( $\text{MnO}_2$  hidratado), birnessita, vernadita, manganita e psilomelano.

Agora, em relação as crostas cobaltíferas ou polimetálicas, estas estruturas podem chegar até cerca de 250 mm de espessura – visto que a espessidão pode alternar dependendo dos processos de sedimentação e as correntes. A densidade total média seca das crostas é  $1,3 \text{ g/cm}^3$  e assim como os nódulos, apresentam porosidade de 60%. A área superficial é de  $300 \text{ m}^2/\text{g}$ .

Representando a importância desses polimetálicos, o cobalto é um minério encontrado em ambas crostas e nódulos e é de extrema importância mundial para a formação de tecnologias de armazenamento de energia. E no oceano, dentre esses nódulos, somente na zona da Clarion Clapton Zone já existem 78 milhões de toneladas de cobalto (BRANCO, 201-). Logo, demonstrando a magnitude de recursos que esses compostos apresentam para a humanidade.

Atualmente, a exploração oceânica já foi feita por alguns países, como por exemplo, Canadá, Japão, África do Sul, evidenciando o crescimento desta área em relação ao mercado. Porém, sabe-se da existência e origem desses metais no oceano desde 1734, com as pesquisas do cientista sueco Emmanuel Swedenborg. Séculos depois, em 1965, o cientista John L. Mero publicou "The Mineral Resources of Sea", o qual foi de extrema importância para a comunidade científica e internacional que desejava explorar estes minérios desde suas descobertas.

Tendo em vista o claro interesse mundial em relação aos polimetálicos, foi criado pelas Nações Unidas em 1994, o ISA (Institute of Seabed Authority), órgão internacional responsável pela legislação e controle de mineração marítimas. Recentemente (durante o mês de janeiro de 2021), foram realizadas por esse órgão, reuniões em Kingston, Jamaica – local sede do órgão – com delegados de mais 168 países para a discussão acerca de onde será permitido a exploração de metais preciosos no fundo mar. Nos dias atuais, cerca de 30 países (Como Rússia, Japão, China, entre outros), com 22 exploradores, já possuem permissões emitidas pela Organização para a pesquisa exploratória e de mineração.

No entanto, ainda que não existam quantidades de explorações em larga escala desses minérios marinhos em comparação à terrestre, já são discutidas preocupações muito válidas: os danos com o meio ambiente.

Por conta disso, diversas organizações de defesa ao meio ambiente temem as consequências e perigos que a exploração do leito marítimo pode trazer ao ecossistema marinho. Em 2019, a organização Greenpeace mandou uma carta à organização da ISA alertando dos perigos gravíssimos e até mesmo inimagináveis que a mineração marítima poderia causar. De acordo com a instituição ambientalista, tem-se pouco conhecimento sobre o ambiente marinho, portanto, as consequências estipuladas podem ser bem mais graves quando colocadas em prática, como por exemplo turbidez nas águas, aumento de temperatura local e prejuízo a biota.

Uma das formas de reduzir esses impactos é controlar, por meio de um resfriador de sistemas, o calor atribuído aos rejeitos gerados após os processos de mineração, os quais sofrem lixiviação química – um processo exotérmico. Isso é necessário pois se espera que os rejeitos possuam maior temperatura em relação a água local, que, caso em temperaturas maiores que o normal, podem prejudicar a biota e o ecossistema marítimo ao redor, ocasionando na destruição de habitats de criaturas sésseis e bentônicas (comunidade de seres vivos que vivem no fundo do mar) que vivem no substrato, prejudicando o ambiente.

Outra forma de diminuir as consequências ambientais marítimas é a descarga de resíduos, que deve correr o mais próximo possível do fundo do mar, o que reporia os sedimentos de volta ao substrato duro, reconstituindo a topografia local parcialmente ou totalmente. Além disso, diminuiria a presença de sedimentos em suspensão na água, que poderiam ser levados pelas correntes e serem depositados em outras áreas, podendo gerar alterações geoquímicas e biológicas em áreas mais biologicamente ativas, que prejudicam espécies mais lentas que não conseguem filtrar a água em níveis altos de turbidez.

Portanto, a solução para este cenário ainda pouco explorado é a mineração consciente, em busca de evitar catástrofes e mitigar as consequências no ambiente marinho que podem tomar proporções muito maiores do que as imaginadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRANCO, Pércio de Moraes, Serviço Geológico do Fundo do Mar (CRPM). Recursos Minerais do Fundo do Mar [201-]. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/CPRM-Divulga/Recursos-Minerais-do-Fundo-do-Mar-2560.html>> Acesso em: 6 de fevereiro.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2021/fevereiro/setor-mineral-supera-expectativas-e-contribui-para-impulsionar-a-retomada-da-economia#:~:text=O%20Minist%C3%A9rio%20de%20Minas%20e,marca%20de%20R%24%20209%20bilh%C3%B5es.&text=O%20aumento%20foi%20de%2031,%24%2032%20bilh%C3%B5es%2C%20em%202020>>. Acesso em: 2 de março.

Figura 3 - PESSOA, Jairo Cleber de Oliveira. Estudo mineralógico e geoquímico de crostas polimetálicas (fe-mn-co) das áreas alpha e bravo da elevação do rio grande, 2015. Campinas: Universidade estadual de Campinas. Disponível em <<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/304754>>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2021.

Figuras 1, 2 - MATTOS, Caio. Pedras “vivas”, e com minerais valiosos, ainda despertam mistérios. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2015, 2018. Disponível em: <<http://www.usp.br/aun/index.php/2018/05/17/pedras-vivas-e-com-minerais-valiosos-ainda-despertam-misterios/>> Acesso em: 20 de março.

GreenPeace International. In Deep Water. Disponível em: <<https://www.greenpeace.org/international/publication/22578/deep-sea-mining-in-deep-water/>>. Acesso em: 1 de março.

HEIN, James R. KOSCHINSKY, Andrea. Deep-Ocean Ferromanganese Crusts and Nodules. Research Gate, 2014. disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/303108085\\_Deep-ocean\\_ferromanganese\\_crusts\\_and\\_nodules](https://www.researchgate.net/publication/303108085_Deep-ocean_ferromanganese_crusts_and_nodules)> Acesso em: 19 de janeiro de 2021.

Mining the deep sea. Video: <https://www.youtube.com/watch?v=6TpibSTjOww>. Acesso em: 21 de março.

PALMA, Jorge J.C. PESSANHA, Ivo B. M. Depósitos ferromanganesíferos de oceano profundo. Scielo, 2001. Disponível em: <[https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-261X2000000300015](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2000000300015)> Acesso em: 14 de janeiro de 2021.

ROCHA, Luciano. Mineração Oceânica: uma alternativa sustentável para o aproveitamento de areias quartzosas. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2015. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-14072016-105049/en.php>> Acesso em: 6 de março.

ZERFASS, Henrique. ZERFASS, Geise de Santana dos Anjos. A sedimentação em uma abordagem sistêmica. Campinas: Universidade estadual de Campinas, 2016. Disponível em: <[https://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v12\\_2/PDF12\\_2/Td-122-169-4.pdf](https://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v12_2/PDF12_2/Td-122-169-4.pdf)>. Acesso em: 2 de março.