

# 02



**Flotação: processos químicos em  
minerais semi-solúveis**

**Mineral salts: chemical processes in  
semi-soluble mining**

---

*Robson Cardoso de Freitas*

DOI: 10.47573/aya.5379.2.57.2

## RESUMO

**Introdução:** As reações químicas precisam passar por vários processos solubilidade para se transformarem, desta forma, através do processo de flotação é necessário que se entenda como o minério se modifica e por quais processos podem passar. **Objetivo:** entender os processos químicos de quimissorção e precipitação de solução acontecem nos minerais semi-solúveis. **Metodologia:** o presente estudo trata-se de uma revisão integrativa com base nos artigos e publicações indexadas no Google acadêmico, Scielo e revistas de engenharia, sendo utilizados artigos em português, inglês e espanhol. **Resultados:** o presente estudo demonstrou as características e particularidades de cada processo químico que pode ser utilizado na flotação de materiais semi-solúveis, de forma que a sua utilização é complexa e de detalhes expressivos. **Conclusão:** o presente estudo demonstrou uma compreensão entre os processos químicos de minerais semi-solúveis e como utilizá-los, ao mesmo tempo é importante que haja uma investigação maior sobre o tema haja vista o conteúdo ser bastante restrito.

**Palavras-chave:** flotação. minerais semi-solúveis. reações químicas.

## ABSTRACT

**Introduction:** Chemical reactions need to go through several solubility processes to transform themselves, in this way, through the flotation process, it is necessary to understand how the ore changes and which processes it can go through. **Objective:** to understand the chemical processes of chemisorption and precipitation of solution that take place in semi-soluble minerals. **Methodology:** the present study is an integrative review based on articles and publications indexed in Google academic, Scielo and engineering journals, using articles in Portuguese, English and Spanish. **Results:** the present study demonstrated the characteristics and particularities of each chemical process that can be used in the flotation of semi-soluble materials, so that its use is complex and with expressive details. **Conclusion:** the present study demonstrated an understanding between the chemical processes of semi-soluble minerals and how to use them, at the same time it is important that there is a greater investigation on the subject since the content is quite restricted.

**Keywords:** flotation. semi-soluble minerals. chemical reactions.

## INTRODUÇÃO

A solubilidade é a medida da capacidade de uma determinada substância se dissolver em outra. Pode ser expresso em porcentagem de soluto ou em unidades como mols por litro ou gramas por litro (BRAGA, 2020).

A solubilidade é a propriedade de alguns minerais que se dissolvem em água, como o gesso. Além disso, alguns minerais solúveis têm sabor salgado, como a halita (sal comum) e a silvina, que é um pouco mais amarga (CORNELIS, 2001).

Os sais minerais semi-solúveis são caracterizados por suas ligações iônicas e se distinguem dos sais minerais solúveis por sua solubilidade limitada em água. Um grupo de sais minerais semi-solúveis sendo considerados são os sais minerais alcalino-terrosos, incluindo fluorita ( $\text{CaF}_2$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e apatita ( $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$ ), bem como celestita ( $\text{SrSO}_4$ ) e barita ( $\text{BaSO}_4$ ).

Outro grupo de sais minerais semi-solúveis a ser considerado são os sais de terras raras, que incluem bastnaesita ((Ce, La) CO<sub>3</sub>F), monazita (CePO<sub>4</sub>) e xenotime (YPO<sub>4</sub>) (OLIVEIRA, PERES, 2010).

A flotação é definida como um processo de concentração mineral em que se tenta separar partículas úteis de minério de estéréis ou ganga, por meio de um tratamento físico químico que modifica sua tensão superficial para garantir que bolhas de ar finamente divididas adiram às primeiras partículas enriquecê-las em uma espuma (DANA, EDWARD, 1979).

Em vista dessa última característica, esse processo também é chamado de flotação por espuma. Tem, sobre outros procedimentos de concentração puramente física, a vantagem de: Ter flexibilidade suficiente para concentrar seletivamente, ou seja, com a produção de concentrados limpos e de alta qualidade, todos os sulfetos e a maioria dos não sulfurados e oxidados. Através de combinações (ou formulações) adequadas de aditivos ou reagentes de flotação (BRAGA, 2020). Adapte-se facilmente ao tratamento em grande escala e com a ajuda de técnicas de controle e medição automáticas, para polpas de minério com ampla faixa de granulometria: entre 48 mesh/polegada até alguns microns (KRAUS, 1975). Facilmente integrável com técnicas modernas de moagem e classificação, bem como meios mecanizados de manuseio de produtos, como bombeamento de separação sólido/líquido (OLIVEIRA, PERES, 2010).

A quimissorção foi proposta por Langmuir em 1916 e ele conduziu seu estudo para moléculas de gás que permanecem ligadas à superfície formando uma ligação química (MANNING, 1995).

As principais características da adsorção química são: interação mais forte que a fisissorção. As entalpias de quimissorção são muito maiores que as de fisissorção e da ordem daqueles liberados na formação de ligações químicas,  $\Delta H_{ads} = (-100 \text{ a } -500) \text{ kJ/mol}$ . É específico. Por envolver a formação de uma ligação entre o adsorbato e o adsorvente, o processo detém após a formação de uma monocamada na superfície. Embora apenas uma camada possa ser adsorvida quimicamente adsorção física de novas camadas pode ocorrer adsorva no primeiro (DANA, EDWARD, 1979)

Tal justificava se dá devido o entendimento que se precisa ter a respeito do dos processos que acontecem com os minerais semi-solúveis para que não haja algum tipo de complicação durante o período de transformação.

Desta forma como objetivo deste estudo é entender os processos químicos de quimissorção e precipitação de solução acontecem nos minerais semi-solúveis, ao mesmo tempo analisar o que é flotação; analisar como ocorre a quimissorção; e por fim verificar o processo de flotação em minerais semi-solúveis.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### Solubilidade dos Sais minerais

Solubilidade é a capacidade de uma substância se dissolver em outro chamado solvente. Refere-se também à massa de soluto que pode ser dissolvida em uma determinada massa de solvente, sob certas condições de temperatura e até pressão (no caso de um soluto gasoso). A

solubilidade pode ser encontrada em diferentes misturas, por exemplo no íon comum, é muito difícil de encontrar já que o íon comum é a principal solubilidade. Se nenhum outro soluto pode se dissolver em uma solução, diz-se que a solução está saturada. Sob certas condições, a solubilidade pode exceder esse máximo e é chamada de solução supersaturada. Pelo contrário, se a solução admite ainda mais soluto, diz-se que é insaturada (BRAGA,2020).

Nem todas as substâncias se dissolvem no mesmo solvente. Por exemplo, na água, o álcool e o sal se dissolvem, enquanto o óleo e a gasolina não se dissolve na água. Na solubilidade, o caráter polar ou apolar da substância tem grande influência, pois, devido a esse caráter, a substância será mais ou menos solúvel; por exemplo, compostos com mais de um grupo funcional exibem alta polaridade, de modo que não são solúveis em éter etílico. Compostos menos reativos, como parafinas, compostos aromáticos e derivados halogenados, apresentam menor solubilidade (OLIVEIRA, PERES, 2010).

O termo solubilidade é usado tanto para designar o fenômeno qualitativo do processo de dissolução quanto para expressar quantitativamente a concentração de soluções. A solubilidade de uma substância depende da natureza do solvente e do soluto, bem como da temperatura e pressão do sistema (MANNING, 1995).

A solubilidade dos sais depende da sua composição química, do seu estado físico e da interação com outros elementos do solo. A solubilidade dos sais afeta sua capacidade de precipitar e dissolver, afetando diretamente a concentração salina da solução do solo. Os sais mais solúveis em geral são cloretos e nitratos, e no outro extremo, os menos solúveis tendem a serem os carbonatos e sulfatos (DANA, EDWARD, 1979).

**Tabela 1 - Solubilidades em água de alguns sais a uma temperatura de 20° (g/l)**

Solubilidades em água de alguns sais a uma temperatura de 20° (g/l)	
CaCO <sub>3</sub>	0,01
MgCO <sub>3</sub>	0,1
CaSO <sub>4</sub> . 2H <sub>2</sub> O	2,40
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	71
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O	195,00
MgSO <sub>4</sub>	262
Ca (HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	262
KNO <sub>3</sub>	316
NaCl	360
Mgso <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O	710
NaNO <sub>3</sub>	921
Mgcl <sub>2</sub> . 6H <sub>2</sub> O	1.670,00
Cacl <sub>2</sub> . 6H <sub>2</sub> O	2.790,00

**Fonte 1: Braga, 2010.**

Quanto maior o número associado a cada elemento, maior a solubilidade. Como visto na tabela, a solubilidade dispara do Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, carbonato de sódio (BRAGA, 2010).

A solubilidade funciona por um conjunto de regras que determinam o quão solúvel uma substância (soluto) está em solução (solvente) e depende inteiramente das propriedades físicas e químicas do soluto e do solvente (MANNING, 1995).

Os solutos normalmente se dissolvem melhor em solventes que têm mais semelhanças moleculares: os solutos polares se dissolvem melhor em solventes polares e os solutos apolares se dissolvem melhor em solventes apolares. Além disso, os solutos serão mais solúveis se as moléculas do soluto forem menores que as do solvente. Isso ocorre porque é mais difícil para as moléculas do solvente envolver moléculas maiores.

A temperatura também afeta a solubilidade porque a solubilidade geralmente aumenta com o calor, exceto para gases, que podem se tornar menos solúveis. A pressão também é um fator chave na solubilidade de um gás. A agitação ou sonicação é muitas vezes necessária para aumentar a taxa de dissolução, mas não influencia a solubilidade de uma substância (BRAGA, 2010).

Todos os solventes existem em um continuum de polaridade. Os solventes podem ser classificados como polares, contendo ligações entre átomos com eletronegatividades muito diferentes (como OH), e apolares, contendo ligações entre átomos com eletronegatividades semelhantes (como CH). Conforme explicado em detalhes abaixo, os solventes polares são classificados como próticos ou apróticos. Solventes próticos polares podem formar ligações de hidrogênio com água para dissolver em água e são melhores para dissolver reagentes polares, como íons. Solventes apolares não são capazes de formar fortes ligações de hidrogênio e são mais bem usados para dissolver reagentes apolares, como hidrocarbonetos (DANA, EDWARD, 1979).

Mesmo quando um solvente apropriado é usado, a solubilidade de uma substância pode ser afetada pelo solvente usado para cristalização do composto, teor de solvente residual, polimorfismo, sal versus forma livre, grau de hidratação, temperatura do solvente e oxigênio dissolvido (BARCELOS *et al.*, 2013).

## Quimissorção

As superfícies de alguns materiais (especialmente catalisadores) são reativas o suficiente para formar ligações químicas com certos gases reativos. Ao contrário da fisissorção, onde as forças de interação adsorvato-adsorvente são fracas, na quimissorção são formadas ligações químicas entre moléculas de adsorvato e locais específicos na superfície do adsorvente, também chamados de sítios ativos (OLIVEIRA, PERES, 2010).

Na quimissorção, ligações químicas são formadas entre moléculas de adsorvato e locais específicos na superfície do adsorvente, também chamados de sítios ativos (MANNING, 1995).

Os ensaios de quimissorção são usados para avaliar quantitativamente o número de sítios ativos na superfície, esses sítios nos catalisadores são os que irão então atuar para promover reações químicas (BRAGA, 2010).

## Precipitação de solução

A precipitação é um processo de obtenção de um sólido a partir de uma solução. Isso pode ser feito por uma reação química, por evaporação do solvente, por resfriamento súbito de uma solução quente ou por mudança de polaridade do solvente. O sólido assim obtido é chamado de precipitado e pode conter impurezas. Em geral será necessário cristalizá-lo e recristalizá-lo (MANNING, 1995).

A precipitação é a formação de um sólido a partir de uma solução ou dentro de outro sólido durante uma reação química ou por difusão em um sólido. Quando a reação ocorre em um líquido, o sólido formado é chamado de precipitado, ou quando compactado por uma centrífuga, um pellet. O líquido que permanece acima dos sólidos é, em ambos os casos, chamado de sobrenadante ou sobrenadante (OLIVEIRA, PERES, 2010).

A precipitação também pode ocorrer especialmente se uma substância insolúvel for introduzida em uma solução e a densidade se tornar maior (caso contrário, o precipitado flutuaria ou formaria uma suspensão). Com substâncias solúveis, a precipitação acelera quando a solução se torna supersaturada. Em sólidos, a precipitação ocorre quando a concentração de um sólido está acima do limite de solubilidade no hospedeiro sólido, por exemplo devido ao resfriamento rápido ou implantação de íons, e a temperatura é alta o suficiente para que a difusão possa resultar em segregação nos precipitados (BARCELOS *et al.*, 2013).

As reações de precipitação podem ser usadas para fazer pigmentos, a remoção de sais da água no tratamento de água e na análise inorgânica qualitativa clássica. A precipitação também é útil para isolar os produtos da reação durante o diagnóstico. Idealmente, o produto da reação é insolúvel no solvente da reação. Portanto, precipita-se à medida que se forma, formando preferencialmente cristais puros (BRAGA, 2010).

Uma etapa importante do processo de precipitação é o início da nucleação. A criação de uma partícula sólida hipotética inclui a formação de uma interface, que requer alguma energia baseada na energia de superfície relativa do sólido e da solução. Se esta energia não estiver disponível e uma superfície de nucleação adequada não estiver disponível, ocorre a supersaturação (BARCELOS *et al.*, 2013).

## METODOLOGIA

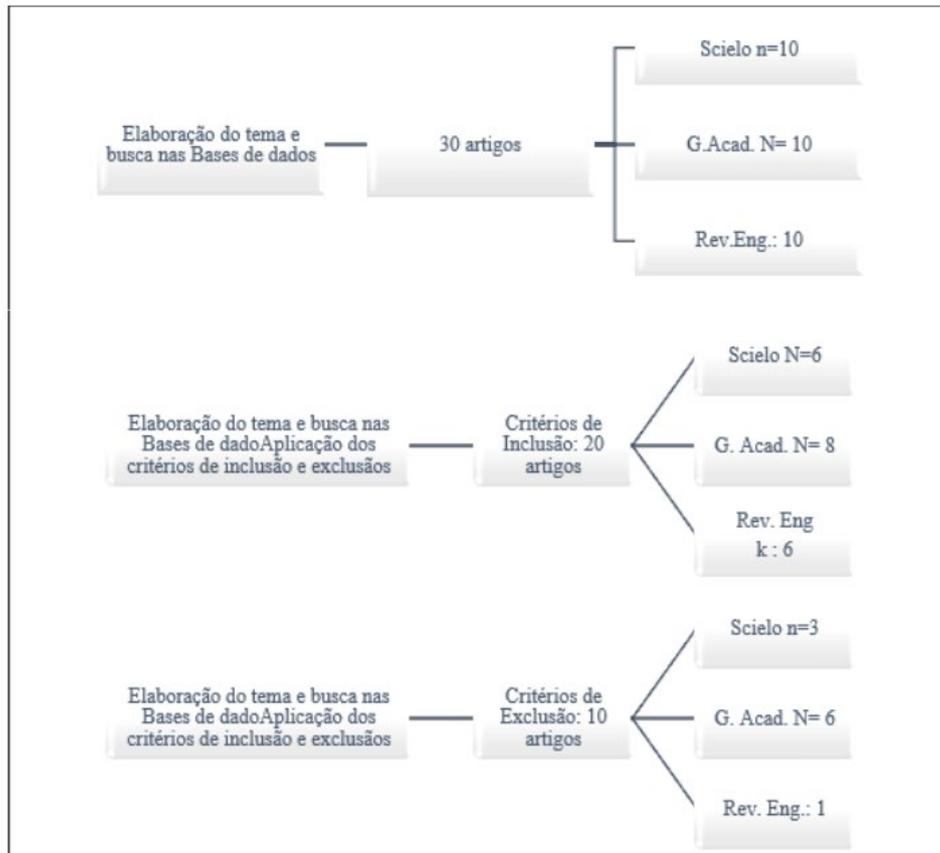
O presente trabalho trata-se de uma pesquisa qualitativa na modalidade revisão de literatura integrativa. A revisão integrativa é mais ampla do que desempenha importante de criar possibilidade de criar novas ideias e direções em um campo de estudo determinado além de estimular pesquisas futuras sobre determinado assunto (SOUSA, 2017).

Foi realizada uma busca de revisão bibliográfica, nas bases de dados eletrônicas como Scielo, Google Acadêmico, Revista de Engenharia e outras que se familiarizaram com o tema.

Os critérios de inclusão adotados foram: artigos de pesquisa original publicados de forma completa no período de 2016 a 2021, livre e gratuita em periódicos disponíveis nas bases de dados selecionadas, nos idiomas português, inglês e espanhol, condizentes com o objetivo proposto e os descritores e/ou palavras-chave listados no protocolo previamente validado. E como critérios de exclusão os artigos que estavam em mais de uma base de dados foram considerados duplicatas e automaticamente excluídos.

A análise baseou pela pesquisa um total de 30 periódicos como mostra o fluxograma 1 para coleta de dados, com o foco apresentado nos estudos relacionados, sobre os Minerais semi-solúveis, tipos de minerais semi-solúveis e transformação de minerais semi-solúveis.

Fluxograma1 - Seleção de estudos para a revisão



Artigos selecionados: 10

A partir da coleta de dados, os 30 artigos encontrados foram submetidos à avaliação por meio da aplicação dos critérios de inclusão 20 artigos foram selecionados e após foram utilizados os critérios exclusão 10 previamente definidos no protocolo de pesquisa, e logo em seguida procedeu-se a leitura completa dos artigos para identificar aqueles que respondiam satisfatoriamente à questão de pesquisa e/ou tinham pertinência com o objetivo do estudo e foram selecionados 10 para análise deste trabalho.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Flotação de minerais

O processo de flotação é uma etapa de concentração mineral que ocorre em três fases (líquida, sólida e gasosa). Para Manning (1995) o mineral valioso é separado do material sem valor, aproveitando suas características físico-químicas por meio da adição de reagentes; Isso favorece a geração de espuma e sua posterior coleta através de calhas ou lavadores, para os quais são utilizados equipamentos mecânicos e/ou pneumáticos, denominados células de flotação.

O processo de flotação de uma planta concentradora é uma etapa fundamental do processo de concentração mineral, pois nela se recolhe o mineral valioso que se reflete no desempenho metalúrgico do processo. Segundo Barcelos *et al.* (2013), isso está na recuperação do material e na qualidade do produto; todos os quais têm um efeito direto no resultado da empresa.

De acordo com Oliveira e Peres (2010) um processo de flotação deficiente faz com que o material seja encaminhado para a próxima etapa de beneficiamento (depósito de rejeitos) que praticamente nunca mais poderá ser processado, apesar de terem ocorrido despesas econômicas significativas nas etapas de extração, mineração, transporte de materiais e nas etapas de na planta de flotação, é possível observar condições operacionais não padronizadas dos diferentes componentes de uma célula e que afetam seu funcionamento, a homogeneização da celulose com o ar da célula de flotação, o que leva a uma operação não padronizada do equipamento e atingir um menor nível de eficiência.

## Processos de flotação de minerais semi-solúveis.

Existem vários processos pelos quais duas substâncias em fases diferentes, por exemplo, um sólido e uma substância em solução, interagem entre si e são agregadas. Para Braga (2010) esses processos são coletivamente chamados de fenômenos de sorção, sendo os tipos amplos absorção e adsorção.

Segundo Manning (1995) a diferença mais importante entre absorção e adsorção é que na absorção há transferência de massa e volume entre as duas fases, enquanto que a adsorção é um fenômeno de superfície que ocorre na superfície da interfase, de modo que o volume e/ou massa de cada fase não é mudo.

Dana e Edward (1979) afirma que mais precisamente, a adsorção é definida como a adesão de átomos, íons ou moléculas de uma substância em fase fluida (gás, líquido ou sólido em solução, chamada de adsorbato) em uma superfície interfásica (adsorvente).

Para que essa adesão ocorra, a interação em nível molecular pode envolver uma reação química ou pode envolver apenas interações físicas, dando origem a dois tipos de adsorção: Fissorção: nenhuma reação química está envolvida na adesão do adsorbente. De acordo com Braga (2020) a quimissorção há uma reação química entre as moléculas de adsorbato e a superfície adsorbente. As moléculas de adsorbente formam ligações químicas com as moléculas de adsorbato. A interação é muito mais forte do que na fisissorção, bem como específica.

A quimissorção pode ser definida como um tipo de adsorção que envolve uma reação química entre a superfície de adsorção e o adsorbato. A quimissorção é utilizada em inúmeras aplicações, destacando-se a catálise de reações químicas, por exemplo, na catálise da hidrogenação de alcenos. Segundo Oliveira e Peres (2010) a hidrogenação de alcenos em um catalisador sólido envolve a quimissorção de hidrogênio e alcenos, que formam ligações químicas com os átomos na superfície sólida.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou uma particularidade dos minerais que são os minerais semi-solúveis, cujo ainda são poucos conhecidos sendo necessários inúmeros estudos mais profundos sobre cada um, entretanto, os dados demonstram que é importante se entender sobre a particularidade das reações químicas que acontecem com estes sais.

O processo de flotação é algo bastante presente e que tem alguns processos que se tornam indispensáveis dentro do processo de minerais semi-solúveis de forma que cada um como

quimissorção e precipitação de solução possuem particularidades específicas.

Portanto o presente estudo demonstrou como os minerais semi-solúveis possuem estruturas, característica e particularidades que são importantes na hora de manipulá-las, ao mesmo tempo vale ressaltar que se precisa de um estudo mais profundo sobre a temática haja vista que o conteúdo possui poucos estudos em andamento principalmente os de origem práticos.

## REFERENCIAS

BARCELOS, A.C.C., *et al.* O efeito de depressores na microflotação de apatita. XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2013, pag. 267-273.

BRAGA, André Soares. Cinética de flotação de silicatos: macro e micro abordagem. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2020.

BRAGA, G.N.M. Tipos e obtenção dos fertilizantes fosfatados. 2010.

CORNELIS, K., Handbook of Mineralogy, 4 edição, baseado no trabalho de JD Dana, 2001.

DANA, S., EDWARD, F. E. Tratado de Mineralogia: Com um Extenso Tratado de Cristalografia and Physical Mineralogy , 1979.

KRAUS, Edward, Mineralogia: Uma Introdução ao Estudo de Minerais e Cristais, 5 Edição, 1965.

MANNING, D. A.C., Minerals for agriculture and the chemical industry. In: MANNING D.A.C. Introduction to Industrial Mineral. Department of Geology, University of Manchesster. London: Chapman e Hall, 1995. p. 83-87.

OLIVEIRA, M.S.; PERES, A. E. Flotabilidade da apatita e minerais de ganga provenientes de minério sílico-carbonatado com oleato de sódio. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 63(3): pag. 551-557, set. 2010.

SOUSA, Luis Manoel. A metodologia de revisão integrativa da literatura em enfermagem. . Revista investigação em enfermagem. 21(2), 17-26. 2017.