

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**  
**(CEFET-MG)**  
**DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**  
**BACHARELADO EM QUÍMICA TECNOLÓGICA**

**Nathália Rayanne Lima**

**REPRODUÇÃO DAS PRÁTICAS ALQUÍMICAS DE PRODUÇÃO DE OURO**  
**SOB A PERSPECTIVA DA QUÍMICA MODERNA**

**Belo Horizonte (MG)**

**2025**

**Nathália Rayanne Lima**

**REPRODUÇÃO DAS PRÁTICAS ALQUÍMICAS DE PRODUÇÃO DE OURO  
SOB A PERSPECTIVA DA QUÍMICA MODERNA**

**Trabalho de conclusão de curso  
apresentado como requisito parcial para  
a obtenção do título de Bacharel em  
Química Tecnológica.**

**Orientador: Prof. Dr. Breno Rodrigues  
Lamaghère Galvão.**

**Corientador: Prof. Dr. Emerson  
Fernandes Pedroso**

**CEFET-MG**

**Belo Horizonte (MG)**

**2025**

**Nathália Rayanne Lima**

**REPRODUÇÃO DAS PRÁTICAS ALQUÍMICAS DE PRODUÇÃO DE OURO  
SOB A PERSPECTIVA DA QUÍMICA MODERNA**

**Trabalho de conclusão de curso do Bacharelado  
em Química Tecnológica  
CEFET-MG**

**Belo Horizonte, 23 de janeiro de 2025**

**Prof. Dr. Breno Rodrigues Lamaghère Galvão  
(orientador – CEFET-MG)**

**Prof. Dr. Emerson Fernandes Pedrosa  
(coorientador – CEFET-MG)**

**Prof. Dr. Igor Vasconcelos Santana  
(avaliador – CEFET-MG)**

**Prof. Dr. Márcio Silva Basílio  
(avaliador – CEFET-MG)**

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto de uma ideia mirabolante que surgiu de repente, e fico imensamente feliz por ter conseguido explorá-la. Foi uma última oportunidade de saciar minha curiosidade, associando um *diquinho* de cada área da Química e me desafiando a reunir o conhecimento que adquiri durante o curso.

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais, Amélia e Luciano, que fizeram todo o possível para que eu pudesse ter um ensino de qualidade e entrar em uma boa faculdade que me permitisse seguir meu sonho.

Aos meus amigos da faculdade, Caíque, Rafaela, Sthéfanie e Bianca. A graduação foi muito mais alegre com vocês ao meu lado. Que a nossa amizade continue para além dos portões do CEFET-MG.

Ao meu namorado, Diego, que nunca permitiu que eu desistisse mesmo quando tudo parecia estar miseravelmente errado. Obrigada por todas as palavras de afirmação quando eu precisei e por ouvir até a mais exaltada das reclamações.

Obviamente, não poderia deixar de agradecer ao meu orientador Breno Galvão, por aceitar me orientar e incentivar esta pesquisa. Ao meu coorientador Emerson Pedroso, que não teve nem um segundo de hesitação antes de embarcar nessa loucura. Aos professores da banca, Márcio Basílio e Igor Santana, pelo apoio durante esses anos e a empolgação para com o meu trabalho.

Também gostaria de agradecer aos professores que ministraram com excelência as aulas durante a graduação e os servidores que mantêm o CEFET-MG funcionando todos os dias. Agradeço especialmente aos professores Janice Rocha, por todos os conselhos e cuidados desde a época de monitoria até os tempos de coordenadora do curso; Patterson Patrício por zelar pelo meu crescimento técnico durante a monitoria; Cleverson Garcia e Flávia Amorim, pelas risadas e conversas no laboratório; e Allbens Atman, pelas histórias compartilhadas e longas conversas sobre a física do universo. Às técnicas do Departamento de Química, Ana Cristina, Aline Vaz e Taiane Guedes, agradeço pela confiança no meu trabalho como estagiária e pelo apoio durante os exaustivos períodos de provas.

A todos que fizeram parte dessa jornada, muito obrigada!

## RESUMO

**LIMA, N. R.; GALVÃO, B. R. L.; PEDROSO, E. F.; Reprodução das Práticas Alquímicas de Produção de Ouro sob a Perspectiva da Química Moderna.**

A alquimia foi uma complexa junção de teorias, crenças e experimentos, que visava compreender o íntimo da natureza e o funcionamento do universo. Por muitos séculos, a principal ambição dos alquimistas foi transmutar objetos através de elixires e da pedra filosofal, desencadeando uma longa busca para descobrir uma fórmula capaz de mudar a natureza dos metais, fazendo-os atingir a perfeição do ouro. Para alcançar esse objetivo, diversas receitas foram criadas. Os alquimistas mantinham essas receitas protegidas com a utilização de símbolos e alegorias, além de restringir o compartilhamento de informações a um grupo seleto de pessoas dignas de possuírem o conhecimento alquímico. Com o intuito de explicar, com os conhecimentos da química moderna, as semelhanças e diferenças do ouro alquímico em relação ao mineral ouro, o presente trabalho reproduz uma das rotas alquímicas mais famosas e antigas para produção de ouro. Esta rota encontrada no Papiro de Leiden e datada aproximadamente do século III d.C., será a base para a realização do trabalho, pontuando-se as possíveis reações químicas ocorridas durante o processo. Observou-se que o produto reage quimicamente com o ácido clorídrico, apresenta risco no teste de dureza ao atritar a amostra com a fluorita e possui densidade semelhante ao estanho metálico. Com o detector de energia dispersiva, foi possível confirmar a ausência de ouro; complementarmente, com a difração de raio X, determinou-se que o produto dourado formado se tratava de sulfeto de estanho IV. Através dos experimentos, constata-se que o ouro alquímico tem apenas a cor e o brilho semelhante ao ouro metálico. Se tratando de uma época em que sobressai a escassez de informações e as mudanças de cor e odor, majoritariamente, guiavam os experimentos, era plausível que os alquimistas acreditassem que era possível transmutar o estanho (e outros metais) em ouro, tendo em vista que as evidências visuais e olfativas contribuíam para essa conclusão.

**Palavras-chave:** Alquimia. Química. Ouro.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### FIGURAS

Figura 1 – Pintura <i>An Alchemist's Laboratory</i> (1650) por David Teniers, O Jovem.....	1
Figura 2 – Teoria dos Quatro Elementos e suas Qualidades ...	7
Figura 3 – Simbologia utilizada por alquimistas e seu possível significado .....	8
Figura 4 – Pintura <i>An Alchemist in his Studio</i> [16--] por Thomas Wyck .....	12
Figura 5 – Pintura <i>O Alquimista</i> (1558) por Pieter Brueghel .....	17
Figura 6 – Ilustração da retorta com cuba de recolhimento de gás acoplada .....	18
Figura 7 – Pintura representando as três fases da Grande Obra alquímica: nigredo, albedo e rubedo.....	22
Figura 8 – Rocha contendo depósito de ouro .....	23
Figura 9 – Cores das ligas de ouro com outros metais usados na indústria de joalheria .....	26
Figura 10 – Etapas da formação do polissulfeto de cálcio .....	33
Figura 11 – Amostra de estanho no início do tratamento com polissulfeto de cálcio.....	35
Figura 12 – Amostra de estanho na metade do tratamento com polissulfeto de cálcio.....	36
Figura 13 – Amostra de estanho tratada com polissulfeto de cálcio .....	36
Figura 14 – Amostra de estanho sem pré-tratamento (à esquerda) e estanho após lavagem com ácido clorídrico (à direita).....	37
Figura 15 – Representação esquemática das forças atuantes na amostra .....	39
Figura 16 – Amostra após atrito com a fluorita.....	40
Figura 16 – Amostra após reação com ácido clorídrico .....	41
Figura 17 – Análise MEV da região cristalina da amostra.....	42
Figura 18 – Análise MEV da região amorfa da amostra .....	43
Figura 19 – Análise EDS com a concentração de (a) estanho, (b) enxofre, (c) oxigênio, (d) nitrogênio, (e) cálcio e (f) ouro na amostra.....	44

## **GRÁFICOS**

Gráfico 1 – Espectro do EDS.....	44
Gráfico 2 – Difratoograma de raio X da amostra .....	45

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANM	Agência Nacional de Mineração
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
DRX	Difração de Raio X
EDS	Detector de Energia Dispersiva (do inglês <i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> )
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MME	Ministério de Minas e Energia
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

**LISTA DE SÍMBOLOS**

$\rho$	densidade
a.C.	antes de Cristo
(aq)	aquoso
$^{\circ}\text{C}$	graus centígrados
cm	centímetros
d.C.	depois de Cristo
E	empuxo
g	gramas
$g$	aceleração da gravidade
(g)	gasoso
m	massa
nm	nanômetros
oz	onça-troy
pH	potencial hidrogeniônico
(s)	sólido
v	volume

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Alquimia .....</b>	<b>4</b>
2.1.1 Alquimia Greco-Egípcia.....	4
2.1.2 Alquimia Islâmica .....	8
2.1.3 Alquimia Europeia.....	11
2.1.3.1 <i>Transição da Alquimia para a Química Moderna</i> .....	17
<b>2.2 Ouro alquímico .....</b>	<b>19</b>
2.2.1 Crisopeia.....	19
2.2.1.1 <i>Elixir</i> .....	20
2.2.1.2 <i>Pedra filosofal</i> .....	21
2.2.2 Papiro de Leiden.....	22
<b>2.3 Ouro .....</b>	<b>23</b>
2.3.1 Obtenção e utilização.....	23
2.3.2 Características físico-químicas .....	24
<b>2.4 Replicações modernas .....</b>	<b>26</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1 Materiais.....</b>	<b>28</b>
3.1.1 Síntese do ouro alquímico .....	28
3.1.1.1 <i>Reagentes</i> .....	28
3.1.1.2 <i>Materiais e Equipamentos</i> .....	28
3.1.2 Caracterização .....	28
3.1.2.1 <i>Reagentes</i> .....	28
3.1.2.2 <i>Materiais e Equipamentos</i> .....	28
<b>3.2 Métodos .....</b>	<b>28</b>
3.2.1 Síntese do ouro alquímico .....	28
3.2.1.1 <i>Produção de água de enxofre</i> .....	28
3.2.1.2 <i>Produção de sulfeto de estanho</i> .....	29
3.2.2 Caracterização .....	30
3.2.2.1 <i>Densidade</i> .....	30
3.2.2.2 <i>Dureza</i> .....	30
3.2.2.3 <i>Reação com ácido clorídrico</i> .....	30

3.2.2.4	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura acoplado ao Detector de Energia Dispersiva</i> .....	30
3.2.2.5	<i>Difração por Raio X</i> .....	31
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>32</b>
4.1	<b>Síntese da água de enxofre</b> .....	<b>32</b>
4.2	<b>Síntese do ouro alquímico</b> .....	<b>34</b>
4.3	<b>Caracterização</b> .....	<b>39</b>
4.3.1	Densidade .....	39
4.3.2	Dureza.....	40
4.3.3	Reação com ácido clorídrico .....	41
4.3.4	Microscopia Eletrônica de Varredura acoplado ao Detector de Energia Dispersiva.....	42
4.3.5	Difração por Raio X .....	45
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>46</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>47</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A alquimia é considerada por muitos a precursora da Química Moderna (FORSTER, 2016). Através de seus trabalhos, os alquimistas deixaram grandes contribuições para a Química, como a descoberta de substâncias amplamente utilizadas nos dias atuais e o desenvolvimento de técnicas e instrumentos (LOMBARDE, 2020). Misturando conceitos de medicina, misticismo, linguagem, astrologia, filosofia e a própria química (LIMA, DA SILVA, 2003; ROBLES; BRIBIESCA, 2004), os alquimistas buscavam respostas sobre o funcionamento da natureza e decifrar os mistérios da vida e do universo.

Figura 1 – Pintura *An Alchemist's Laboratory* (1650) por David Teniers, O Jovem.



Fonte: Guercio, 2020.

Não é possível dizer o momento exato na história onde surgiu a alquimia. Sua origem se encontra em tempos remotos onde não temos registros (CHASSOT, 1995). Acredita-se que a alquimia tenha surgido em Alexandria, entre os séculos III a.C. e I a.C., entretanto, os textos mais antigos os quais temos conhecimento datam do século III d.C. (LOMBARDE, 2020).

Os documentos escritos por alquimistas eram codificados para que apenas os iniciados na arte da alquimia pudessem compreender plenamente seus ensinamentos (FORSTER, 2016; STROHMAIER, 2016). As receitas eram transcritas com simbolismos, alegorias e outras formas de ocultar o significado real das palavras (ROBLES; BRIBIESCA, 2004). Essa prática era necessária para que leigos não tivessem acesso às informações de pesquisa, também para fugir da perseguição religiosa e estatal que sofriam por frequentemente serem associados à bruxaria e ocultismo (LIMA, DA SILVA, 2003). Os escolhidos eram proibidos de divulgar os segredos da alquimia. Eram submetidos a um juramento de silêncio, o qual, se desobedecido, tinha como castigo a pena de morte por envenenamento (SANTOS, 2006).

Por longos anos os alquimistas tinham como um dos objetivos principais a criação do metal mais nobre: o ouro. Para tal, a principal metodologia era a transmutação, técnica que consistia em transformar os metais menos preciosos no metal nobre ouro (CHASSOT, 1995; GUERCIO, 2020). Os alquimistas do período grego-egípcio acreditavam que para fazer ouro era necessário descobrir a proporção dos Quatro Elementos (água, terra, fogo e ar), uma vez que essa era uma teoria já bem estabelecida no pensamento grego. A partir desse conhecimento, os alquimistas islâmicos confiavam que seria possível criar a pedra filosofal, um pó vermelho capaz de transformar qualquer metal em ouro (LIMA, DA SILVA, 2003; PRINCIPE, 2013; ROBLES; BRIBIESCA, 2004).

Apesar de a alquimia ser desencorajada pelos conhecimentos da Química Moderna, segundo Principe (2013), há uma quantidade surpreendente de pessoas que continuam em busca de realizar a transmutação de elementos metálicos. Como citado em sua obra *Os Segredos da Alquimia* (2013, pag. 2, tradução livre) “a alquimia, portanto, continua a existir em uma variedade de faces e disfarces”.

Durante os vários séculos de pesquisas alquímicas, várias receitas de como produzir ouro foram criadas e testadas, apesar de nenhuma delas ter alcançado o objetivo (LOMBARDE, 2020). Uma das rotas mais famosas é registrada no Papiro de Leiden, documento encontrado no Egito, na cidade de Alexandria, no século XIX. Acredita-se que o papiro foi escrito por volta do século III d.C., apesar de conter receitas que podem ser mais antigas que a época que o papiro foi redigido (BORGES *et al*, 2020).

O estudo da alquimia tem grande importância para compreender como a ciência moderna foi desenvolvida, além de combater preconceitos do meio acadêmico sobre a índole dos alquimistas (BORGES *et al*, 2020). Em livros didáticos utilizados nas escolas

de ensino médio, até 2018, as imagens e artefatos retratados são majoritariamente relacionados a alquimia europeia (COSTA; BENITE, 2020), revelando uma grande lacuna na difusão das contribuições técnicas e científicas que alquimistas das regiões africanas ou não-europeias conquistaram séculos antes, reforçando estereótipos comportamentais – os quais foram guiados pela visão da Igreja – e raciais, com o eurocentrismo em detrimento de outras regiões.

A alquimia tem uma escassez de trabalhos especializados (LOMBARDE, 2020), dificultando o entendimento avançado sobre suas técnicas e a cronologia dos eventos. Além disso, há um obstáculo insistente para os historiadores da alquimia: descobrir se os autores têm a identidade que dizem ter e se viveram na época que os textos relatam, devido à alta incidência de pseudônimos, mistérios e pistas falsas a respeito dos alquimistas (PRINCIPE, 2013). Portanto, torna-se ainda mais valioso o estudo dos experimentos realizados pelos alquimistas de séculos atrás para tentar entender como as metodologias empíricas moldaram o pensamento científico, e desvendar os rumos da história desde a alquimia até a ciência como conhecemos hoje.

O presente trabalho tem como objetivos a reprodução da rota para produção de ouro utilizada pelos alquimistas, encontrada no Papiro de Leiden, e a caracterização dos compostos sintetizados através de testes físico-químicos e instrumentais, visando compreender as semelhanças e diferenças dos produtos em relação ao ouro metálico.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Alquimia

Nascida da união do conhecimento artesanal e de especulações teóricas e filosóficas sobre a natureza da matéria (PRINCIPE, 2013), a alquimia se tornou uma complexa junção de vários segmentos relacionados à filosofia, astrologia, misticismo e a própria química. O conhecimento alquímico consiste em tradições, saberes e conhecimentos do mundo que foram passados para aprendizes através de textos e relatos orais. Tendo íntima ligação com a metalurgia, a alquimia consolidou um extenso estudo da transformação dos metais com o auxílio do fogo, observando as mudanças de cor, aspecto e forma (LIMA, DA SILVA, 2003). Os aparatos alquímicos e as suas técnicas foram uma base para a ciência que conhecemos como Química Moderna (GUERCIO, 2020).

É uma tarefa difícil traçar uma cronologia assertiva a respeito da origem e fim da alquimia, sendo de igual dificuldade o completo entendimento dos relatos deixados por alquimistas devido às codificações e alegorias fortemente presentes nas obras alquímicas (OLIVEIRA; BUFFOLO; CALIXTO, 2019; STROHMAIER, 2016). Apesar da incerteza, acredita-se que a “grande obra da alquimia” tenha durado cerca de 2100 anos, tendo como marco inicial a alquimia praticada por gregos e egípcios e o marco final atribuído à morte de Antoine Lavoisier em 1794, durante a Revolução Francesa (ROBLES; BRIBIESCA, 2004).

#### 2.1.1. Alquimia Greco-Egípcia

A alquimia grego-egípcia tem início em meados do século III a.C., em Alexandria. Acredita-se que foi o primeiro berço da alquimia no mundo ocidental, sendo os gregos considerados por muitos estudiosos como os primeiros alquimistas “verdadeiros” (BORGES *et al*, 2020; LIMA, DA SILVA, 2003). A alquimia alexandrina tem forte influência babilônica, egípcia, judaica e persa, tendo nascido em uma época de grande esplendor da ciência grega. Também abrange uma combinação das artes práticas dos povos antigos da Mesopotâmia, com a mistura do misticismo da população hebraica e persa, e a própria filosofia grega (LOMBARDE, 2020; SANTOS, 2006).

Os primeiros textos alquímicos que se tem conhecimento datam do século I d.C. A origem da palavra *alquimia* também surge na mesma época: ao mesclar as palavras

*cheo* (derreter ou fundir) e *chuma* (lingote de metal), surge o termo *cheimeia*, que significa “arte de derreter os metais” (PRINCIPE, 2013; SANTOS, 2006).

Várias obras alquímicas foram escritas no período grego-egípcio, tendo autoria atribuída não só a alquimistas, como a deuses e heróis. Um grande nome na alquimia grega foi Trismegisto, o Três Vezes Grande, sendo o conjunto das obras atribuídas a ele conhecido como Corpus Hermeticum (LIMA, DA SILVA, 2003) ou Hermética (PRINCIPE, 2013). Trismegisto também era conhecido sob o nome Hermes, sendo ele uma figura mitológica grega-egípcia. Segundo Lima e da Silva (2003), uma obra importante atribuída a Hermes é a Tábua de Esmeralda, um compilado dos ensinamentos alquímicos, condensados em frases criptografadas para impedir que o conhecimento fosse obtido por pessoas não-iniciadas na arte da alquimia. A Tábua era considerada como um texto fundamental para os alquimistas gregos-egípcios, e, posteriormente, para os alquimistas árabes. A origem da Tábua de Esmeralda ainda é incerta, mas evidências indicam que a obra foi escrita em um período precedente ao século VII (PRINCIPE, 2013; SANTOS, 2006).

Se tratando da alquimia egípcia, um sacerdote-artesão egípcio chamado Zósimo (século III - século IV) é seu maior representante. Zósimo viveu em uma região a leste do rio Nilo, chamada Panópolis – a qual se tornou sua alcunha posteriormente. Acredita-se que ele desempenhava as funções de escriba e artesão em seu templo (BARBIERI, 2022). Através das obras de Zósimo de Panópolis, foi possível obter informações sobre alquimistas anteriores a ele. Parte das obras de Zósimo foram traduzidas para o siríaco nos séculos XV e XVI, outra parcela se encontra em árabe ou latim, e ainda há boa parte redigida em grego. Acredita-se que ele escreveu 28 obras dedicadas a alquimia, de uma série chamada *Manufaturas*, porém foram perdidas com o tempo, restando apenas alguns fragmentos que foram organizados com base em cada letra do alfabeto grego (BARBIERI, 2022; LOMBARDE, 2020).

Zósimo descreveu aparelhos úteis para destilação, sublimação e filtração, sendo eles derivados de utensílios de cozinha ou de perfumaria. Segundo Principe (2013), Zósimo parecia particularmente interessado na interação entre vapores e sólidos, advindo de observações práticas. Ele acreditava que o metal era formado por duas partes: o corpo (soma) e o espírito (pneuma). Enquanto o espírito trazia a cor e as propriedades particulares, o corpo seria o mesmo para todos os metais, desse modo, a identidade do metal estava no espírito, e não no corpo. Para ocorrer a transmutação, era necessário juntar

os espíritos a outros corpos, separando-os com procedimentos que usavam fogo, como sublimação, destilação e volatilização. Desse modo, as obras alquímicas buscavam entender a relação entre a natureza e as forças vitais, unindo suas crenças e tradições às suas formas de interpretar a natureza (OLIVEIRA; BUFFOLO; CALIXTO, 2019).

Para proteger suas ideias, Zósimo utilizava uma técnica atualmente chamada de *decknamen*, uma palavra alemã que significa “esconder o nome”. Ao invés de usar o nome comum da substância, este era substituído por outro nome que tivesse alguma conexão metafórica ou literal com a substância que se desejava esconder. Os próximos alquimistas também adotaram essa técnica, de modo que a autoria dos textos alquímicos da época variava entre anônimos, seres míticos (como Hermes e Ostanos), personagens (tal como Maria, a Judia) ou pseudoepígrafos (autoria falsa). Além de manter o conhecimento em segredo, o *decknamen* fornecia uma comunicação discreta entre os alquimistas que sabiam decifrar o sistema. Todas as substituições eram lógicas, pois deveria ser possível ser decifradas posteriormente por outras pessoas adeptas da alquimia (BARBIERI, 2022; PRINCIPE, 2013).

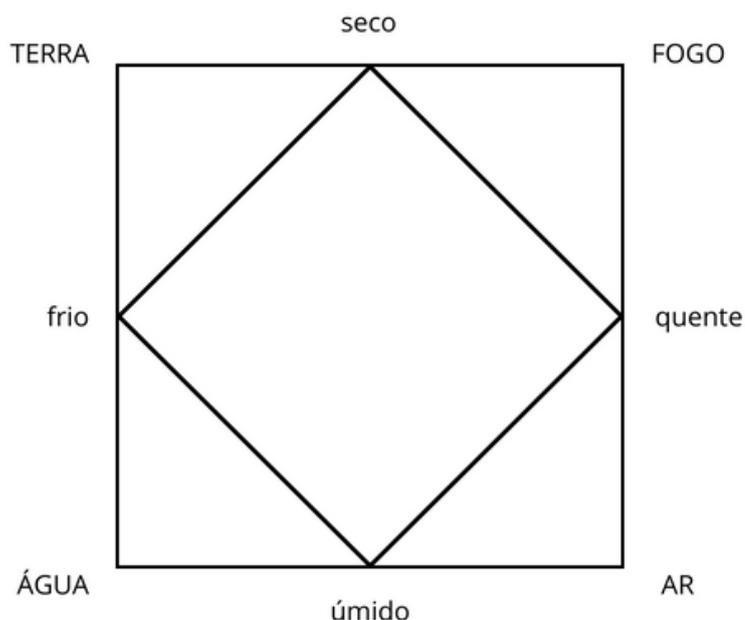
Os alquimistas do período greco-egípcio conheciam outras operações para a manipulação de materiais, como a calcinação, banho de areia e banho-maria. A invenção de alguns equipamentos utilizados em laboratório também é atribuída a eles: retortas, alambique de três bicos, balões e frascos vieram a ser produzidos por mentes gregas. O banho-maria e o alambique são creditados à alquimista Maria, a Judia (BORGES *et al*, 2020).

Os primeiros notórios alquimistas também eram filósofos. Para compreender o desenvolvimento das ideias alquímicas, deve-se explorar as teorias desses filósofos da época. Para tal, é necessário examinar ainda mais atrás na linha do tempo.

Sabe-se que desde os tempos mais remotos, nove das substâncias que hoje chamamos de elementos eram conhecidas pela civilização: ouro, prata, cobre, ferro, estanho, chumbo, magnésio, carbono e enxofre (GUERCIO, 2020; ROBLES; BRIBIESCA, 2004). O filósofo Leucipo (século V a.C.) e seu discípulo Demócrito (460 a.C. – 370 a.C.) acreditavam na existência de partículas mínimas de matéria, as quais viriam a ser denominadas átomos. Para Demócrito, o Universo era constituído por átomos e espaços de vazio. Com base nesse pensamento, o filósofo Empédocles (495 a.C. – 430 a.C.) estabeleceu a Teoria dos Quatro Elementos: os materiais seriam constituídos de fogo, terra, água e ar. Posteriormente, Aristóteles (384 a.C. – 322 a.C.) complementou a

teoria ao acrescentar as definições de estado quente, frio, seco e úmido. Desse modo, a água era o resultado da combinação de frio e úmido; o ar era úmido e quente; o fogo era quente e seco; e a terra, seca e fria (PARDO, 2018; SANTOS, 2006).

Figura 2 – Teoria dos Quatro Elementos e suas Qualidades.



Fonte: Adaptada de Santos, 2006.

Moldando o pensamento alquímico, Platão (428 a.C. – 347 a.C.) alegava que a perfeição de um corpo estava ligada ao equilíbrio das partículas elementares que a compunham. Desse modo, nascia a grande filosofia regente da alquimia: encontrar o equilíbrio necessário para transformar os materiais em ouro, o metal perfeito (ROBLES; BRIBIESCA, 2004).

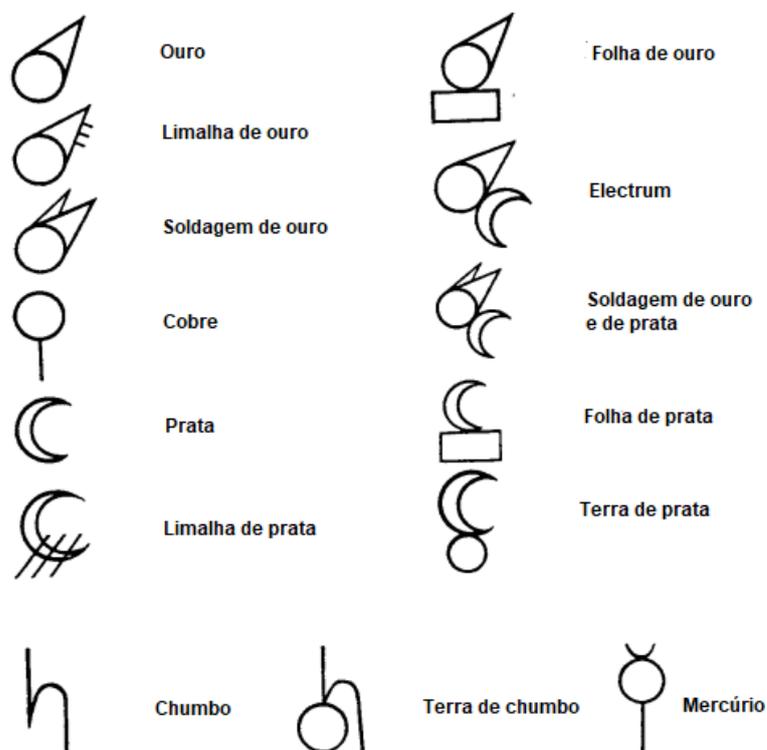
A ideia de fazer ouro e prata verdadeiros usando metais menos valiosos como material de partida surgiu no século III d.C., apesar de não haver textos que descrevem como exatamente iniciou-se essa ideia. Os alquimistas tinham conhecimento que a “água sulfurosa” (solução de sais de enxofre) conseguia tingir metais de modo que estes pareciam ouro, logo, seria sensato pensar que, de alguma forma, essa água poderia ser usada para mudar a estrutura do metal, dando-o não só a cor, mas todas as características do ouro. O agente de transmutação, portanto, seria a água de enxofre, a qual era chamada por Zósimo de *xerion*. Mais tarde, na alquimia islâmica, a ideia seria amadurecida até dar origem à famosa Pedra Filosofal (PRINCIPE, 2013).

### 2.1.2. Alquimia Islâmica

A alquimia islâmica, também chamada de alquimia árabe, teve início no final do século VII, quando os árabes conquistaram o Egito e tiveram contato com as obras alquímicas vindas da Grécia. Os alquimistas islâmicos trabalharam as ideias gregas e remodelaram o conhecimento trazendo-o para a sua própria visão e interesses (LIMA, DA SILVA, 2003). Os historiadores acreditam que o primeiro alquimista árabe foi o príncipe Khalid ibn Yazid (668 d.C. – 704 d.C.), um entusiasta responsável por conectar a alquimia grega com a alquimia árabe ao ordenar a vinda de alquimistas gregos para traduzir suas obras (LOMBARDE, 2020).

A alquimia árabe herdou o forte pensamento que o conhecimento alquímico deveria ser compartilhado apenas com um seletivo grupo de pessoas. Os alquimistas utilizavam metáforas, alegorias e símbolos para dificultar o entendimento dos indivíduos não selecionados e manter o conhecimento alquímico protegido. Para tal, utilizavam os métodos de ensino e aprendizado baseados nos alquimistas gregos e egípcios (FORSTER, 2016).

Figura 3 – Simbologia utilizada por alquimistas e seu possível significado.



Fonte: Adaptado de Robles e Bribiesca, 2004.

Os dois maiores nomes da alquimia islâmica são o filósofo árabe Jabir (721 d.C. – 815 d.C.) e Al-Razi (864 d.C. – 925/935 d.C.). Jabir não foi um grande alquimista somente na era islâmica; sua relevância atravessou continentes e seu nome se tornou conhecido mesmo séculos após sua morte (LOMBARDE, 2020; ROBLES; BRIBIESCA, 2004). Sendo chamado de Geber no Ocidente, suas ideias ajudaram a modelar a futura alquimia europeia.

A alquimia árabe, como dito, teve influência direta da alquimia grega. A Teoria dos Quatro Elementos de Empédocles, juntamente com o complemento de Aristóteles a respeito das Quatro Qualidades, era uma teoria tratada como doutrina na Grécia. Quando as ideias alquímicas foram trazidas para a Arábia, essa teoria teve grande influência no raciocínio dos alquimistas islâmicos. Tal influência pode ser vista na obra “Teoria dos Balanços”, sob autoria de Jabir, onde os balanços citados se referem ao equilíbrio de qualidades ou propriedades, e não à quantidade de massa. Ele acreditava que da combinação de duas qualidades se originava um composto, e da união de dois compostos se davam os Quatro Elementos (LOMBARDE, 2020).

O primeiro trabalho conhecido de Jabir é chamado “*De alchemia traditio summae perfectionis in duos libros divisa*”, em tradução livre, “Uma tradição de alquimia da mais alta perfeição, dividida em dois livros”. Essa obra é uma compilação de todo o conhecimento e crenças que regiam a alquimia até então. Nesse texto, havia relatos sobre ácido nítrico, sais inorgânicos e destilação (ROBLES; BRIBIESCA, 2004).

A ideologia que mais teve predominância na alquimia islâmica era que os metais eram compostos por diferentes proporções de mercúrio e enxofre (GUERCIO, 2020; ROBLES; BRIBIESCA, 2004). Essa teoria foi disseminada por Jabir, tendo como base as ideias de um alquimista chamado Balinus, e sua obra Livro do Segredo da Criação (PRINCIPE, 2013). Aproximando a teoria dos Quatro Elementos e a teoria das Quatro Qualidades à ideia da proporcionalidade mercúrio-enxofre, dizia-se que o mercúrio era responsável pelas qualidades frio e úmido, enquanto o enxofre era quente e seco. Esses princípios se condensavam embaixo da terra em diferentes proporções, formando os metais. Quando o mercúrio e o enxofre eram impuros ou se combinavam em proporções inadequadas, os metais básicos eram produzidos. Para Jabir, a transmutação ocorreria quando as proporções das naturezas externas (os elementos) e internas (as qualidades)

fossem acertadas de acordo com o metal que se deseja obter (LOMBARDE, 2020; OLIVEIRA; BUFFOLO; CALIXTO, 2019; PRINCIPE, 2013).

Segundo Principe (2013), dentre os 7 metais conhecidos, o ouro e a prata eram considerados nobres e os restantes eram tratados como básicos. A nobreza de um metal dizia respeito a beleza intrínseca e a resistência à corrosão. Quando Zósimo dizia “mercúrio” e “enxofre”, não necessariamente estava se referindo aos elementos; tratava-se de uma analogia para as exalações seca e úmida, pois os alquimistas islâmicos tinham o conhecimento de que ao misturar mercúrio e enxofre não iriam obter um novo metal. A teoria mercúrio-enxofre sobreviveu por muitos anos, sendo referenciada em textos quase 1000 anos depois de ser proposta. Isso se deve ao caráter observável e lógico da teoria: ferro e cobre quando pulverizados exalavam um cheiro semelhante a enxofre; estanho e chumbo derretem com relativa facilidade, sendo difícil distingui-los do mercúrio.

O segundo alquimista mais importante da era islâmica, Al-Razi, se dedicou ao estudo alquímico voltado para a medicina, trazendo contribuições especialmente para a ginecologia e oftalmologia (LOMBARDE, 2020). Seus textos permaneceram com grande importância até os anos 1600. Apesar de ter escrito vários trabalhos, tem-se conhecimento apenas de uma publicação, do chamado “O Livro do Segredo dos Segredos”. Essa obra era dividida em três partes: substâncias, aparelhos e operações. Al-Razi discutiu conceitos de destilação, calcinação, dissolução, evaporação, cristalização, sublimação, filtração, amalgamação e cerração (conversão das substâncias em sólidos pastosos). Frequentemente lido como um manual de laboratório, Al-Razi fez uma classificação sistemática de substâncias que ocorrem naturalmente – como pedras, metais, sais e voláteis –, listando suas variedades, como identificá-las e purificá-las. Incluso no texto, havia descrições de como sintetizar uma grande diversidade de produtos, demonstrando possuir vasta experiência prática (PRINCIPE, 2013).

Al-Razi também possuía interesse na transmutação, sendo o tema de várias receitas de seu livro. Ele acreditava que a transmutação não era uma possibilidade apenas em metais; pedras não preciosas, cristais e até mesmo vidro eram passíveis de transmutação com o uso do elixir adequado (PRINCIPE, 2013).

Como ideologia, Al-Razi acreditava que um corpo era composto por partículas indivisíveis e por espaços vazios entre elas, semelhante ao pensamento de Demócrito. Além disso, havia os Cinco Princípios: o criador, a alma, a matéria, o tempo e o espaço.

Para Al-Razi, a transmutação ocorria ao alterar a proporção dos cinco princípios. (LOMBARDE, 2020)

A alquimia árabe foi responsável por imensas inovações, expandindo o conhecimento sobre materiais e equipamentos para muito além do que os gregos tinham acesso (PRINCIPE, 2013). No século XII, os alquimistas progrediram em seus experimentos e foi possível sintetizar o ácido clorídrico, água régia (mistura de ácido clorídrico e ácido nítrico na proporção de 3:1), potassa, carbonato de sódio, sulfato de amônio e sulfato de sódio (PARDO, 2018; ROBLES; BRIBIESCA, 2004).

Quando algo chama muita atenção, logo surgem críticas. E com a alquimia não poderia ter sido diferente. O maior crítico no período Islâmico foi Avicena (980 d.C. – 1083 d.C.), o qual negava veemente a existência da transmutação. Usando como base a crença de que os seres humanos são falhos e ignorantes, ele dizia que os alquimistas não possuíam poder para transformar uma coisa em outra, pois as substâncias criadas naturalmente por Deus não poderiam ser reproduzidas artificialmente por humanos. As imitações feitas por alquimistas poderiam ter as características externas do ouro, mas não seriam ouro verdadeiro. O pensamento de Avicena foi muito difundido, posteriormente sendo traduzido para o latim e moldando opiniões na Europa (PRINCIPE, 2013).

### 2.1.3. Alquimia Europeia

O início da alquimia europeia possui uma data: 11 de fevereiro de 1144, o dia em que o monge inglês Robert de Chester completou a tradução do livro alquímico árabe *Sobre a composição da alquimia* (PRINCIPE, 2013). Outros textos escritos ou traduzidos pelos árabes chegaram na Europa durante o século XII (LOMBARDE, 2020). A partir dessas obras, a Europa ganhou mais conhecimento nas áreas de astronomia, matemática, mecânica, física e engenharia, além de ser apresentada a um campo totalmente novo: a alquimia. Segundo Principe (2013), os europeus não apenas aceitaram a alquimia, eles tiveram ávido interesse em seu conteúdo.

Figura 4 – Pintura *An Alchemist in his Studio* [16--] por Thomas Wyck.



Fonte: Guercio, 2020.

Dominada pela Peste, durante a Baixa Idade Média (século XI – século XIII) os alquimistas europeus se preocuparam majoritariamente em estudar como manipular a natureza (LOMBARDE, 2020). A Igreja Católica se posicionou fortemente contra o estudo da alquimia, principalmente ao perceber que o Clero começava a desviar sua atenção da Igreja. De forma a retomar o controle da classe, a Igreja bradava que a alquimia era como um campo aberto para oportunistas, charlatões e ambiciosos. Decretos foram aprovados para proibir os estudos alquímicos, intensificando a perseguição contra os alquimistas e a necessidade de proteger o conhecimento com a utilização de signos e símbolos (LIMA, DA SILVA, 2003; OLIVEIRA; BUFFOLO; CALIXTO, 2019).

A partir do século XIII, as traduções de textos alquímicos diminuíram bastante. Foi nesse ponto que os autores da Europa Latina começaram a redigir suas próprias obras alquímicas (PRINCIPE, 2013).

Quando a alquimia Islâmica estava se formando, havia obras árabes sob pseudônimos gregos. A alquimia Europeia seguiu o mesmo caminho. As primeiras obras

latino-europeias nasceram de autores utilizando pseudônimos árabes e gregos. A intenção dos autores era dar maior autoridade ao texto, fazendo-o parecer mais antigo e influente (CÂNDIDO, 2022; PRINCIPE, 2013). O trabalho mais marcante desta nova fase da alquimia surgiu sob autoria de “Geber”, um nome bastante familiar. Historiadores discutiram se Geber era apenas uma tradução latina do nome Jabir ou era o pseudônimo de algum autor europeu, mas descobriram que esse nome se referia a um autor europeu do século XIII: Paulo de Taranto, um frade franciscano (PÉREZ-BUSTAMANTE, 2007; PRINCIPE, 2013).

A principal obra de Geber é denominada “Teoria e Prática”, onde minerais e substâncias eram classificados de acordo com as propriedades físicas e químicas que foram observadas. Paulo queria harmonizar a teoria com a prática para explicar os fenômenos de forma coerente. Para tal, ele fez diversos testes práticos, com um rigor raramente observado em obras árabes (PRINCIPE, 2013).

Os alquimistas europeus levavam muito a sério a ideia de descobrir a natureza das coisas. Isso era perceptível na obra *Summa perfectionis* (A Soma da Perfeição, tradução livre). O texto começa discutindo uma questão: é possível ou não transmutar materiais em ouro? No final da argumentação, conclui-se que era sim possível realizar a transmutação. A obra prossegue com um detalhado sumário que reúne o conhecimento de metais e minerais, incluindo métodos para purificá-los e trabalhar com eles. As próximas seções descrevem aparatos e operações práticas essenciais para os alquimistas, e a última seção tem a descrição da natureza e propriedades dos metais. A *Summa* foi um dos trabalhos mais relevantes da Idade Média, sendo considerada como autoridade na alquimia até o século XVII (PRINCIPE, 2013).

Os estudos alquímicos se dividiram em dois: liderada pelo filósofo inglês Robert Grosseteste (1175 d.C. – 1253 d.C.), iniciou-se a corrente experimentalista; ao lado do filósofo alemão Alberto Magno (1200 d.C. – 1285 d.C.), o doctor *universalis*, estava a segunda vertente de estudos. Alberto acreditava que a transmutação acontecia somente na natureza, pois a formação dos metais era gerada no interior da Terra a partir de manifestações úmidas e secas. As reflexões geradas por Alberto fizeram com que outros pensadores se interessassem pela alquimia, dentre eles, o frade inglês Roger Bacon (1220 d.C. – 1292 d.C.), o qual tinha maior interesse nos conhecimentos da área prática da alquimia (LOMBARDE, 2020).

Roger Bacon foi um estudioso que se debruçou na alquimia, tendo-a como uma “ciência experimental” ou “ciência da experiência” (LIMA, DA SILVA, 2003). As obras de Bacon tinham argumentos a favor do estudo de linguagens, matemática, filosofia e alquimia como reforma do conhecimento e fortalecimentos da cristandade (PRINCIPE, 2013). Bacon também acreditava que o ouro era o metal perfeito, sendo possível transformar os metais inferiores em ouro através do uso da pedra filosofal. Além disso, havia a crença que o elixir da vida, amplamente buscado pelos alquimistas árabes, era sintetizado ao dissolver o ouro em água régia (ROBLES; BRIBIESCA, 2004). Ao contrário do que achavam os críticos da alquimia, Bacon acreditava que o ouro alquímico era melhor que o ouro original, pois o artífice humano produzia materiais melhores que a natureza (PRINCIPE, 2013).

Roger Bacon tinha a crença que apenas os dignos deveriam ter acesso às informações alquímicas, pois apenas os homens sábios eram capazes de compreender os ensinamentos da alquimia. Para proteger o saber alquímico, ele propunha que as informações fossem transmitidas através de símbolos em canções, palavras conhecidas apenas por iniciados na alquimia, supressão de vogais, mistura de diferentes tipos de letras, uso de letras criadas pelo próprio alquimista, substituição de letras por figuras geométricas, abreviação de palavras e fragmentação de informações (CÂNDIDO, 2022).

Os estudos de Bacon eram focados na reflexão das práticas alquímicas, ao invés do desenvolvimento de novas ideias e invenção de substâncias e equipamentos. Para Bacon, a alquimia era dividida em dois tipos: a alquimia especulativa, onde se reunia o conhecimento para gerar as matérias inanimadas, os vegetais, os animais e o homem; e a alquimia operativa, a qual interessava-se a metalurgia, com a busca pela pedra filosofal e pelo elixir da vida (CÂNDIDO, 2022). Através de seu trabalho, ficou conhecido como “organizador do saber”. Sua contribuição mais importante foi unir o empirismo alquímico com a experimentação e desenvolvimento matemático, aproximando a alquimia da Química como é conhecida hoje. Segundo Bacon, a alquimia prática era a mais importante das ciências, sendo responsável pelo o que mais tarde viria se chamar de Primeira Revolução Química (LOMBARDE, 2020).

Houve uma nova revolução nos conhecimentos alquímicos a partir do Renascimento, durante os séculos XIV e XVI. O médico suíço Paracelso (1493 d.C. – 1541 d.C.) foi o responsável pela Segunda Revolução Química. Sendo uma das maiores referências da alquimia em sua época, ele afirmava que os alquimistas estavam perdendo

tempo ao tentar transmutar metais em ouro, enquanto deveriam se concentrar em produzir remédios químicos para a cura de doenças e moléstias; acreditava que o ideal era haver um remédio específico para tratar uma doença específica, tendo em vista que as doenças do corpo eram causadas por agentes externos. Paracelso foi um dos pioneiros no uso da alquimia aplicada à medicina, contestando a medicina tradicional que se baseava em observação e experiência, envolvendo a dissecação de corpos humanos. Para fundamentar suas opiniões, realizou várias viagens em busca de aprimorar o conhecimento alquímico. Paracelso modificou as ideias árabes e fundou a teoria *Tria Prima*: os corpos eram formados pela mistura de enxofre, mercúrio e sal. O enxofre era responsável pela inflamabilidade, o mercúrio pela volatilidade e o sal trazia a cor, solidez e imutabilidade (GUERCIO, 2020; LOMBARDE, 2020; OLIVEIRA; BUFFOLO; CALIXTO, 2019; ROBLES; BRIBIESCA, 2004).

Outros nomes também trouxeram essenciais contribuições para a alquimia, sendo eles: São Tomás de Aquino, Raimundo Lúlio e Basílio Valentim. Como fruto dos estudos destes nomes, desvendou-se o uso do antimônio, a fabricação de amálgama e o descobrimento do álcool etílico a partir do vinho (ROBLES; BRIBIESCA, 2004). Durante o século XVII, os conhecimentos alquímicos rumaram para aplicações industriais, como a confecção de tintas e pigmentos, pólvoras, perfumes, bebidas alcólicas, produção de ácidos e purificação de metais. Apesar do conhecimento alquímico ser aplicado em diversos produtos contidos na rotina da sociedade, os alquimistas continuavam sendo chamados de charlatões e fraudulentos (GUERCIO, 2020; PÉREZ-BUSTAMANTE, 2007).

Ao final do século XVII, surgiu a última grande teoria alquímica: a teoria do flogisto (ou flogístico). Essa teoria tinha a finalidade de explicar o fenômeno de combustão, pois o flogisto era o responsável pela característica de inflamabilidade dos materiais (LUCA; WALZ, 2020). A base que posteriormente seria usada para criar essa teoria foi pensada por Johann Joachim Becher (1635 d.C. – 1682 d.C.), o qual acreditava que existia três “terras”: a terra lápida (também chamada de terra vítrea), sendo os sais e os princípios sólidos da matéria; a terra *pinguis* (ou gordurosa), correspondente ao princípio sulfúrico ou ígneo da matéria; e a terra *mercurialis* (ou fluida), que funcionaria como substituição do mercúrio. Essas “terras” seriam as substâncias básicas, e a combinação delas seriam a origem dos corpos e suas características (ALFONSO-

GOLDFARB, 2005). Essa teoria foi divulgada em sua obra *Physica Subterraneae* (Física Subterrânea, tradução livre) em 1669 (PRADO; CARNEIRO, 2018).

No início do século XVIII, George Ernest Stahl, um professor alemão de medicina, desenvolveu ainda mais a teoria de Becher para explicar melhor a combustão dos materiais, acrescentando suas críticas e comentários, e lançando-o sob o nome *Specimen Beccherianum*. Essa obra se tornou o preceito da teoria do flogisto (ALFONSO-GOLDFARB, 2005; PRADO; CARNEIRO, 2018).

Stahl transformou a terra *pinguis* de Becher em flogisto, uma substância impalpável que estaria presente nos corpos inflamáveis. Essa substância poderia escapar desses corpos através da combustão e ser transmitida para outros corpos. O flogisto poderia ser absorvido pelo ar – hipótese compartilhada por Becher, que acreditava que o ar não era um componente da matéria, mas participava das reações ao absorver o flogisto do meio até sua saturação, a qual daria fim no processo de combustão (ALFONSO-GOLDFARB, 2005; LUCA; WALZ, 2020).

Quando um metal passava pelo processo de combustão (ou calcinação), era liberado o flogisto, restando a cal do metal. Essa cal poderia ser aquecida, recuperando seu flogisto e restaurando suas propriedades metálicas (ALFONSO-GOLDFARB, 2005; VANIN, 2005).

A teoria do flogisto conseguia explicar os aspectos qualitativos das reações de combustão, mas pecava nas observações quantitativas. Os alquimistas entendiam a combustão como a perda de algo que queima, evidenciada pela presença de uma chama que parecia se desprender do material. Se o flogisto era perdido, era esperado que o produto fosse mais leve que o material de partida, entretanto, os materiais orgânicos perdiam massa na combustão e os metais ganhavam massa na calcinação, e ambos eram explicados como perda de flogisto. Para contornar a situação, Stahl dizia que a perda de flogisto criava espaços vazios na matéria restante, a qual era reagrupada e se tornava mais densa, o que deveria explicar o aumento da massa. Outros defendiam a hipótese que havia um tipo de flogisto com peso negativo, que seria repellido pela Terra. Também havia a hipótese que a massa inicial do material era negativa, e, quando separada do flogisto, ganhava massa. As divergências nas explicações dos fenômenos de combustão e calcinação obrigavam os adeptos da teoria do flogisto a formularem contínuas adaptações e hipóteses. A inconsistência e complexibilidade das explicações levaram, posteriormente, à queda da teoria (PRADO; CARNEIRO, 2018; VANIN, 2005).

A rotina dos alquimistas em seus laboratórios foi uma inspiração recorrente para pintores holandeses dos séculos XVII e XVIII, tornando-se populares tanto em relação à cultura quanto à arte nos Países Baixos. As pinturas do século XVII retratavam a época onde a alquimia e a química estavam muito unidas; as pinturas posteriores já reproduziam a diferenciação entre ambas (GUERCIO, 2020).

Figura 5 – Pintura *O Alquimista* (1558) por Pieter Brueghel.



Fonte: Guercio, 2020.

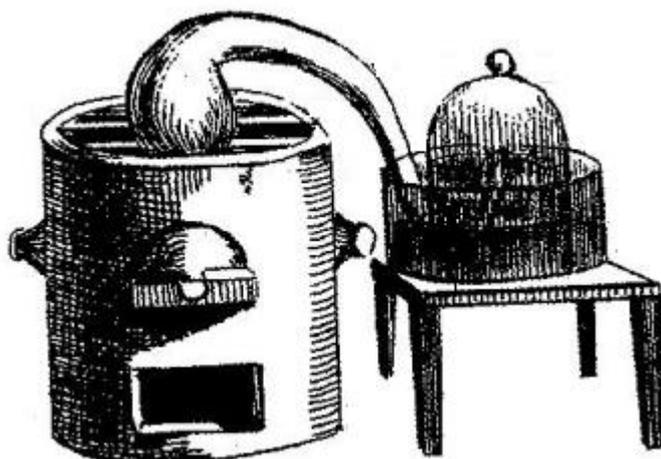
### *2.1.3.1. Transição da Alquimia para a Química Moderna*

A separação entre a alquimia da transmutação e a química experimental se deu no século XVIII, de modo que a química se tornasse uma ciência que dizia respeito à realidade, e para a alquimia restasse a natureza filosófica (GUERCIO, 2020; PÉREZ-BUSTAMANTE, 2007). Para os alquimistas, a experimentação era uma forma de se aproximar das relações entre as criaturas e Deus, enquanto o pensamento voltado para a química se baseava em medições, quantificações e observações (OLIVEIRA; BUFFOLO; CALIXTO, 2019). A partir dessa época, a medicina, com seus medicamentos à base de substâncias químicas como mercúrio e antimônio, e a metalurgia, com a mineração e fundição de metais, trouxeram contribuições importantes para o que, mais tarde, se tornaria a Química Moderna. Ambas vertentes ocasionaram no progressivo abandono das técnicas puramente alquímicas – juntamente com suas características místicas (PARDO, 2018).

O químico mais relevante do século XVIII foi Antoine Laurent Lavoisier (1734 d.C. – 1794 d.C.), um advogado e cobrador de impostos, membro da alta sociedade francesa e simpatizante da química. Lavoisier desenvolvia estudos sobre iluminação, utilizando salitre e pólvora. Durante seus estudos, ele observou que o fósforo, enxofre e outros metais apresentaram um aumento de massa após o aquecimento. Até aquele momento, o aumento da massa era atribuído ao aumento de flogisto, que se combinava com os vapores da combustão (PRADO; CARNEIRO, 2018).

Lavoisier realizou experimentos controlados, medindo a variação de massa com quantidades determinadas de oxigênio. A partir de 1774, Lavoisier concentrou seus estudos na calcinação de diferentes metais e suas singularidades. Ele fez um teste significativo com a calcinação de mercúrio, o qual foi previamente pesado, em uma retorta acoplada a uma cuba de recolhimento de gás. Ao longo do aquecimento, foi observado que houve um aumento da massa de mercúrio e uma diminuição gradual do volume de gás na cuba (PRADO; CARNEIRO, 2018). Através de seus experimentos, Lavoisier provou que a queima dos materiais era uma reação com o oxigênio do ar, e que a cal do metal era, na verdade, um óxido metálico. A regeneração do metal acontecia porque durante a queima do óxido, era produzido dióxido de carbono, e essa combinação de carbono e oxigênio deixava o metal livre. Portanto, Lavoisier concluiu que não havia flogisto, e sim uma reação do metal com o oxigênio do ar durante a queima ou uma reação do óxido metálico com o carvão (VANIN, 2005).

Figura 6 – Ilustração da retorta com cuba de recolhimento de gás acoplada.



Fonte: Adaptada de Prado; Carneiro, 2018

A publicação do Tratado Elementar de Química em março de 1789, com o intuito de proporcionar aos leitores a possibilidade de conhecer verdadeiramente as leis da natureza e trazendo a sistematização do conhecimento químico com base na observação e experimentação, é considerada o início da Química Moderna. Lavoisier estabeleceu o Princípio da Conservação das Massas, é fundador da base científica para a nomenclatura química e de fundamentos elementares da orgânica, além de ser considerado pai da bioquímica ao estudar a fermentação e a respiração. Lavoisier foi a peça-chave para uma Revolução Química (PRADO; CARNEIRO, 2018; VANIN, 2005).

A química teve uma valorização crescente ao se tornar uma disciplina acadêmica reconhecida em universidades por volta de 1720. Enquanto isso, a alquimia teve seu declínio, gradativamente tendo seu conhecimento obscurecido e obliterado (GUERCIO, 2020). Alguns dos motivos que contribuíram para o declínio da alquimia são a intolerância desde a época da Baixa Idade Média, repleta de superstições e animosidades contra alquimistas; fraudes propositais com a criação de falso ouro; e instauração do método científico experimental (PÉREZ-BUSTAMANTE, 2007).

## **2.2 Ouro alquímico**

### **2.2.1. Crisopeia**

A crisopeia, também chamada de “Nobre Arte”, é definida hoje como o conjunto de práticas com objetivo de transmutar metais em ouro, tratada como um guia para os alquimistas desde o período greco-egípcio, sendo um movimento forte e estruturado já no século IV d.C. Vinda do grego *chrysopoeia*, é a junção das palavras *chryson* (ouro) e *poiein* (fazer). Também há o correspondente para a transformação em prata, a *argyropoeia* (BARBIERI, 2022; PRINCIPE, 2013).

O ouro era um metal de grande interesse para os alquimistas por vários motivos: era o metal mais bonito devido sua cor e seu brilho; era resistente a corrosão, fogo e outros materiais; além de ser símbolo de riqueza e poder (SANTOS, 2006).

A restrição da palavra alquimia para se referir apenas à crisopeia só veio no século XVII. Antes disso, a alquimia se referia a todos os processos e conceitos que hoje são considerados como parte da Química (PRINCIPE, 2013).

### 2.2.1.1. Elixir

A palavra “elixir” tem origem na Grécia. Os alquimistas gregos chamavam os agentes de transmutação de *xerion*, uma palavra que originalmente se referia a um pó medicinal utilizado para curar feridas (PRINCIPE, 2013). O termo *xerion* foi traduzido e adaptado na Arábia para *al-iksir*, e, posteriormente, foi resumido a *elixir*. Em ambas as regiões, o elixir seria um pó seco capaz de transformar metais menos nobres em ouro e prata (STROHMAIER, 2016).

Na alquimia islâmica, a visão do elixir era um pouco distinta da admitida pelos alquimistas do período greco-egípcio. Além de ser a peça-chave para a transmutação de metais em ouro, segundo Al-Razi, o elixir também tinha o poder de transformar pedras não preciosas em pedras preciosas, como a esmeralda e o rubi (LOMBARDE, 2020). Para Jabir, o elixir era capaz de curar os metais ao ajustar a sua proporção de qualidades. Cada metal precisava de um elixir específico, assim como cada paciente precisava de um remédio de acordo com sua enfermidade (PARDO, 2018; PRINCIPE, 2013). Desse modo, cada elixir era composto de uma quantidade matematicamente calculada de qualidades, que, quando adicionada ao metal, o transformaria em ouro. Segundo Principe (2013), Jabir acreditava que o elixir poderia ser preparado a partir de qualquer matéria, pois as quatro qualidades existiam em todas as substâncias. Nesse ponto os alquimistas islâmicos entraram em desacordo com os alquimistas gregos e egípcios, que acreditavam na existência de uma única substância a qual dava origem ao elixir.

As etapas necessárias para a síntese do elixir, segundo os alquimistas islâmicos, consistiam em purificar o material de partida; fundi-la para transformá-la em uma espécie de amálgama; dissolver o produto com água agudas – interpretadas como soluções amoniacaais ou alcalinas – para o material se desintegrar em partes sutis; e, finalmente, solidificar o material restante após remoção da água (ALFONSO-GOLDFARB, 2005, LOMBARDE, 2020). Na alquimia grega, dedicava-se ao menos 14 dias para a síntese completa do elixir, na alquimia islâmica houve uma preocupação em acelerar o tempo da síntese, tendo em vista que essa era a maior ambição dos alquimistas árabes (LIMA, DA SILVA, 2003; STROHMAIER, 2016).

Quando o termo chegou na Europa, adquiriu um novo significado: o elixir era um líquido mágico que ao ser ingerido era capaz de curar doenças (STROHMAIER, 2016), de modo que seria capaz de prolongar a vida, segundo a visão de Roger Bacon. O elixir era um remédio tanto para o corpo humano, quanto para os metais, sendo usado

para alcançar a proporção perfeita de mercúrio e enxofre dos materiais, transformando-os em ouro. Bacon sugere que o material de partida tenha que passar, possivelmente, pelas operações de calcinação, pulverização e sublimação (CÂNDIDO, 2022; LOMBARDE, 2020).

#### 2.2.1.2. *Pedra Filosofal*

A pedra filosofal era considerada uma das peças-chave da transformação de qualquer material em ouro, alcançando sua máxima perfeição. Junto a ela, seria possível curar doenças, aperfeiçoar o corpo e encontrar o elixir da juventude eterna (ROBLES; BRIBIESCA, 2004). Havia duas espécies da pedra filosofal: uma branca, utilizada para transformar metais em prata; e outra vermelha, visando a transformação em ouro (PRINCIPE, 2013).

Seguindo a Teoria dos Quatro Elementos, dizia-se que a pedra filosofal tinha como material de partida a tetrasoma, um material constituído de chumbo, estanho, cobre e ferro. A síntese deveria ser realizada em quatro etapas: melanose, leucose, xantose e iose (SANTOS, 2006; LOMBARDE, 2020).

A melanose era a etapa onde se obtém a tetrasoma, caracterizada pela cor preta causada pelo resultado da oxidação. A etapa seguinte, leucose, seria inserir vapor de arsênio no meio, produzindo uma liga superficial de arsênio e cobre. O sucesso da reação seria perceptível pela presença da cor branca na superfície da liga. A xantose corresponde ao tratamento do produto da leucose com a chamada “água divina” ou “água sulfurosa”. É uma solução aquosa de sulfetos alcalinos ou alcalinos-terrosos descrita por Zósimo. Esse produto deveria ter a cor amarela. A última etapa, iose, era considerada a mais difícil devido às reações paralelas que poderiam ocorrer durante a síntese. O êxito em produzir a pedra filosofal era relacionado à obtenção de um sólido vermelho na iose. Anos mais tarde, as quatro etapas foram traduzidas pelos latinos como nigredo, albedo, citrinita e rubedo, respectivamente (LOMBARDE, 2020).

Figura 7 – Pintura representando as três fases da Grande Obra alquímica: nigredo, albedo e rubedo.



Fonte: Trattato Pretiosissimum Donum Dei, publicado por Georges Aurach em 1475.

Segundo Santos (2006), um historiador de alquimia chamado Hopkins reinterpretou a receita da pedra filosofal, utilizando os conceitos químicos atuais: o material de partida seria uma mistura dos quatro metais imperfeitos (chumbo, estanho, cobre e ferro), os quais mediante a presença de mercúrio e arsênio se tornariam esbranquiçados. Posteriormente, com a adição de água sulfurosa (solução aquosa diluída de polissulfeto de cálcio) e um pouco de ouro, passaria a apresentar a cor amarela. Por último, teria a cor violeta, devido às reações do bronze com a pequena quantidade de ouro.

### 2.2.2. Papiro de Leiden

O Papiro de Leiden é um papiro que foi encontrado no Egito no século XIX e atualmente reside em um museu na cidade de Leiden, na Holanda. Foi redigido em grego, por volta do século III d.C. (BORGES *et al*, 2020). Esse papiro contém receitas relacionadas a ouro, prata, pedras preciosas e tintura de tecidos. Também há instruções de como fazer imitações de ouro e prata – tingir prata para parecer ouro ou tingir cobre para parecer prata –, fazer pérolas e esmeraldas artificiais, corante de cor parecida ao roxo imperial, um produto de alto valor comercial na época. Havia testes para determinar a pureza de metais e pedras, então os alquimistas que agiam de má fé estavam cientes e sabiam diferenciar o verdadeiro do falso (PRINCIPE, 2013).

A obra italiana *Compositiones variae* – Várias Composições, em tradução livre –, datada de aproximadamente ano 800, tem a tradução palavra por palavra das receitas contidas no Papiro de Leiden. Entretanto, os tradutores nunca chegaram perto de um laboratório medieval, de modo que há receitas de diversas datas e com significados distorcidos por não conhecerem a terminologia (PRINCIPE, 2013).

## 2.3 Ouro

### 2.3.1. Obtenção e utilização

O ouro é um metal precioso encontrado em solo brasileiro em quartzos ricos de pirita e arsenopirita (FIORILLO, 2023). Também pode ser encontrado associadas a sulfetos, em todos os continentes, sendo extraído de rochas antigas formadas nas eras arqueana e proterozoica ou terrenos terciário-quadernários. Esses depósitos são gerados por eventos vulcânicos e alterações das rochas (MME, 2009).

Figura 8 – Rocha com depósito de ouro.



Fonte: Golden Mineração. Disponível em: <<https://www.goldenmineracao.com/mina-de-ouro/>>.

Acesso em: 27 dez. 2024.

Originado do latim *aurum*, que significa aurora reluzente (JUNQUEIRA *et al*, 2012), foi o principal produto comercializado na economia brasileira no século XVIII. A produção aurífica no Brasil é realizada pelo garimpo, dragagem industrial e por extração em filões profundos (FIORILLO, 2023) e é considerada um grande produtor no cenário mundial (LOBATO; COSTA, 2018). O Brasil tem a sexta maior reserva mineral com 2.400 toneladas de ouro, sendo o equivalente a 4,44% das reservas mundiais (MME, 2023).

O preço do ouro é resultado da relação entre a demanda e a produção. Por ter alta densidade, o custo do transporte do centro produtor até as grandes metrópoles é barateado. Os centros produtores de ouro são as minas e garimpos, enquanto as metrópoles são responsáveis por transformar a matéria-prima em barras ou joias, pois as formas mais sofisticadas do ouro possuem maior valor agregado (MME, 2009). Para a comercialização do ouro, considera-se a medida onça troy (oz t), a qual equivale a 31,1034678 g. O preço do ouro varia de acordo com uma cotação associada ao dólar estadunidense (LOBATO; COSTA, 2018).

Com base nos dados coletados entre 2010 e 2021, nota-se que a maior demanda de ouro é para o setor joalheiro, com média de 2.200 toneladas de ouro por ano. A segunda maior demanda é registrada para o setor de investimentos financeiros, com o uso anual médio de 1.300 toneladas, para a confecção de moedas, barras, medalhas e ETF (Exchange Trade Funds, ou Fundo de Índice Negociado em Bolsa, em português). Em terceiro lugar, tem-se os bancos centrais, com demanda de 470 toneladas de ouro, e em quarto lugar, o setor de tecnologia – envolvendo a fabricação de componentes eletrônicos e odontológicos – com o uso anual médio de 350 toneladas. Enquanto a demanda de ouro pelos bancos centrais tem aumentado desde 2010, a demanda no setor tecnológico vem decrescendo na última década (MME, 2023).

Com a demanda mundial de mais de 4.000 toneladas de ouro por ano (MME, 2023), surge a necessidade de novas lavras para abastecer o mercado nacional e internacional. Nesse cenário, o garimpo brasileiro se estende para a ilegalidade, sobretudo na região da Floresta Amazônica ou de Terras Indígenas (MANZOLLI; RAJÃO, 2022).

Segundo o estudo idealizado pelo Instituto Escolhas (2022), 229 toneladas de ouro com indícios de ilegalidade foram comercializadas no Brasil entre 2015 e 2020. Esse valor representa quase metade de todo o ouro comercializado durante esses 5 anos. Para o estudo, compreende-se como indicativo de ilegalidade o ouro proveniente de Terras Indígenas, Unidades de Conservação (áreas naturais protegidas por lei para a preservação da fauna e flora), títulos fantasmas (sem indicação de onde foi realizada a extração), títulos onde há a extração para além dos limites permitidos pela Agência Nacional de Mineração (ANM), ouro sem registro do título de origem e o ouro exportado com registro incoerente à produção oficial.

### 2.3.2. Características físico-químicas

O ouro é um elemento encontrado na tabela periódica, localizado na família 11 e no período 6. Possui massa molecular igual a  $196,966 \text{ g mol}^{-1}$ , densidade de  $19,3 \text{ g cm}^{-3}$ , dureza 2,5 a 3, número atômico 79 e ponto de fusão de  $1079 \text{ }^\circ\text{C}$ . Sua distribuição eletrônica é semelhante à do xenônio, porém acrescida de 25 elétrons, resultando na configuração  $[\text{Xe}] 4f^{14}5d^{10}6s^1$ . Ele pode ser encontrado sob os estados de oxidação +1, +3 e +5 (COTTON *et al*, 1999; JUNQUEIRA *et al*, 2012; LOBATO; COSTA, 2018).

O ouro pode ocorrer como metal nativo, mas frequentemente está associado a prata em quantidades variadas, e algumas vezes contém traços de cobre e ferro. O ouro forma complexos teluretos, sendo os principais a silvanita, a calaverita e a krennerita. A principal diferença entre esses minerais é a sua geometria de cristalização: monoclinica para as duas primeiras espécies e ortorrômbica para a última (MME, 2009).

Há três classes principais de depósitos de ouro: os veios, geralmente alojados em rochas sedimentares, ígneas ou metamórficas; os sulfetos maciços vulcanogênicos; e os pláceres – vindo do inglês *placer* –, que são depósitos naturais de ouro nativo (LOBATO; COSTA, 2018).

A pureza do ouro é medida em partes por mil, representada quase sempre pela relação  $1.000 \text{ Au} / (\text{Au} + \text{Ag})$ . Em média, o ouro nativo tem pureza em torno de 85% a 95%. O volume restante é completado com outros metais: prata, cobre, platina, bismuto, mercúrio, paládio, antimônio, rutênio, irídio e urânio. A partir da mistura desses metais, é originada as variações do ouro. Como exemplos, temos o ouro argentífero, com 5 a 10% de prata; o ouro cuprífero, contendo de 10 a 20% de cobre; o ouro paladiado, com 5 a 10% de paládio; o ouro platinífero, com até 10% de platina; e ouro bismútico, que possui até 3% de bismuto. A pureza do ouro também é medida em quilate, a qual representa a relação do ouro contido em uma liga com outros metais, de acordo com a proporção de  $1/24$  (ou  $4,1666\dots\%$  ou  $41,66\dots$  milésimos), em peso. O ouro 24 quilates (representado como 24k), ou seja, o de mil milésimos ( $1.000/1.000$ ) é o ouro puro. A existência do ouro puro é teoricamente possível, entretanto, na prática, o teor máximo de pureza obtido é de  $999,95/1000$  partes de ouro (MME, 2009).

Quando está em estado puro, o ouro é maleável, portanto, pode sofrer torção, flexão ou laminação, desse modo, é necessário o acréscimo de outros metais para que o ouro atinja as características necessárias para utilização industrial. A coloração comum do ouro é amarela, porém, ao formar liga com outros metais, a cor final pode variar. Ao se misturar com prata, níquel, paládio ou zinco, a liga se torna branca; as ligas verdes são

geradas pela mistura de ouro com cádmio, enquanto as ligas azuis indicam a presença de ferro, ou alumínio se forem roxas (MME, 2009).

Figura 9 – Cores das ligas de ouro com outros metais usados na indústria de joalheria.

AMARELO	VERDE	BRANCO	VERMELHO	ROSA	NEGRO
					
75% Au 12,5% Ag 12,5% Cu	75% Au 15% Ag 6% Cu 4% Cd	75% Au 12,5% Ag 12,5% Pd	75% Au 25% Cu	75% Au 22,5% Cu 2,5% Ag	75% Au 25% Co
Au = ouro   Ag = prata   Cu = cobre   Cd = cádmio   Pd = paládio   Co = cobalto					

Fonte: Adaptado de Ateliê Labriola. Disponível em <https://www.atelielabriola.com.br/post/2015/11/14/ouro-e-suas-diferentes-cores>. Acesso em 04 jan. 2025.

## 2.4 Replicações modernas

Há registros de replicações modernas dos métodos alquímicos de produção de ouro, sendo a mais recente ocorrida em 2020. Um grupo de alunos orientados pelo Prof. Dr. Carlos Alberto Lombardi Filgueiras (UFMG) realizou experimentos laboratoriais alquímicos, visando “recriá-los num laboratório moderno, mostrando sua validação à luz da química atual” (BORGES *et al*, 2020). As práticas realizadas nesse trabalho foram: produção de ouro alquímico; destilação do etanol; síntese dos ácidos sulfúrico, nítrico e clorídrico; síntese dos pigmentos verdete e branco de chumbo; síntese de cosmético para pintura facial, a estibina; produção do medicamento manteiga de antimônio; e produção do régulo de antimônio (BORGES *et al*, 2020).

Antes disso, alguns químicos se debruçaram nos relatos alquímicos, relacionando os conhecimentos fragmentados que os alquimistas possuíam com descobertas e experimentações características da química moderna. No século XIX temos como exemplo os químicos Cyprien Théodore Tiffereau (1819-1898) e Stephen Emmens. Tiffereau apresentou à Academia de Ciências de Paris uma série de documentos descrevendo como transformar a prata em ouro utilizando reagentes comuns, feito que

alega ter conseguido realizar enquanto estava no México. Entretanto, Tiffereau não conseguiu replicar seus resultados em Paris. No final dos anos 1890, Emmens compartilhou no Tesouro dos Estados Unidos um método de transmutar prata em ouro, mas as replicações realizadas nos EUA e na Inglaterra com seu método não foram efetivas (PRINCIPE, 2013).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados durante este trabalho estão descritos nos subtópicos a seguir. Os experimentos foram realizados nos laboratórios 5 (Campus Gameleira do CEFET-MG) e 210 (Campus Nova Gamaleira do CEFET-MG).

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1. Síntese do ouro alquímico

###### 3.1.1.1. *Reagentes*

Os reagentes necessários para a síntese do ouro alquímico foram o enxofre em pó (marca Sulfal, sem validade), ureia P.A. (marca CAAL Reagentes Analíticos, lote 11.866, validade 06/03/2006), hidróxido de cálcio P.A. (marca Merck, lote 638479, sem validade) e estanho sólido.

###### 3.1.1.2. *Materiais e Equipamentos*

Os equipamentos utilizados foram a balança (KERN 440-53), chapa de aquecimento (IKA C-MAG HS-7), espátula metálica, funil de transferência, garra, papel de filtro faixa azul (Química Moderna, lote 08367, validade 06/2024), suporte universal e termômetro de mercúrio.

##### 3.2.1 Caracterização

###### 3.2.1.1 *Reagentes*

Os reagentes necessários para a caracterização dos produtos foram o ácido clorídrico concentrado (marca Neon, validade 15/02/2020) e amostra de fluorita.

###### 3.2.1.2 *Materiais e Equipamentos*

Os equipamentos utilizados foram a balança semi analítica (marca Mark), difratômetro de raio X (marca Shimadzu, modelo XRD-700) e microscópio eletrônico de varredura (marca Shimadzu, modelo SSX-550)

#### 3.2 Métodos

##### 3.2.1 Síntese do ouro alquímico

###### 3.2.1.1 *Produção de água de enxofre*

A primeira parte da síntese do ouro alquímico é a produção da chamada “água de enxofre”, caracterizada pela reação de cal com enxofre em meio aquoso com presença de ureia ou ácido acético. De acordo com a receita contida no Papiro de Leiden, traduzido por Robert Halleux, a obtenção da água de enxofre é realizada da seguinte forma:

*Invenção da água de enxofre. Um punhado de cal, e o mesmo de enxofre em pó fino; ponha-os num recipiente contendo vinagre forte, ou a urina de um menino impúbere; aqueça por baixo até que o líquido sobrenadante se pareça como sangue; decante-o adequadamente para separá-lo do depósito, e use (HALLEUX, 1981 apud BORGES et al, 2020).*

A metodologia aplicada foi a reprodução da receita do modo mais fidedigno possível, realizando uma filtração simples como procedimento adicional para maior eficácia. Devido a ambiguidade do termo “punhado”, realizou-se duas sínteses: a primeira com quantidades de massa iguais para a cal e o enxofre; e a segunda com volumes iguais para os dois reagentes.

Em ambos os procedimentos, adicionou-se em um béquer água destilada e ureia. Agitou-se com o auxílio de um bastão de vidro. Posteriormente, foram acrescentados hidróxido de cálcio e enxofre em pó. Novamente, utilizou-se o bastão de vidro para acelerar a dissolução dos componentes sólidos.

A mistura foi levada a aquecimento intenso em uma chapa de aquecimento. Após o aparecimento de uma cor vermelha intensa na solução, o aquecimento foi interrompido.

O béquer foi deixado sob repouso por 30 minutos, até a observação de um precipitado no fundo do recipiente. Realizou-se uma filtração simples da solução sobrenadante, utilizando um papel de filtro e um funil de transferência. A solução filtrada foi transferida para um recipiente de plástico, rotulada e reservada.

#### 3.2.1.2. *Produção de sulfeto de estanho*

Segundo BORGES et al (2020), a produção do ouro alquímico é realizada através do tratamento de estanho com o polissulfeto de cálcio previamente sintetizado.

Utilizou-se uma amostra de cerca de 5 cm de estanho metálico, sob a forma de barra. O tratamento consiste em aplicar a solução avermelhada na superfície da amostra.

### 3.2.2. Caracterização

#### 3.2.2.1. *Densidade*

Para determinar a densidade, utilizou-se a metodologia a seguir, adaptada de Silva e Fonseca (2021):

Mediu-se a massa da amostra. Prendeu-se um fio de massa desprezível na parte inferior de uma balança semi-analítica. Pendurou-se a amostra de estanho a esse fio e mergulhou-se a amostra em um béquer com água. Mediu-se a massa da amostra submersa e aferiu-se a temperatura da água no momento do teste.

#### 3.2.2.2. *Dureza*

Para aferir a dureza do mineral de acordo com a Escala de Mohs, necessita-se expor o mineral a um atrito que seja capaz de retirar partículas de sua superfície (VAZ, 2016).

Utilizou-se uma amostra qualitativa de estanho metálico, previamente tratada com polissulfeto de cálcio, e fluorita. Atritou-se, em linha reta, a extremidade que aparentou ser mais pontiaguda da fluorita na superfície da amostra. Observou-se a presença ou ausência de uma marcação em forma de risco provocada pela fluorita.

#### 3.2.2.3. *Reação com ácido clorídrico*

Para testar a reatividade dos metais em meio ácido, separou-se uma amostra qualitativa de estanho metálico previamente tratada com polissulfeto de cálcio, e colocada em uma placa de petri. Em seguida, despejou-se algumas gotas de ácido clorídrico concentrado na superfície da amostra. Observou-se a ocorrência ou ausência de evidências físicas e/ou químicas de reação.

#### 3.2.2.4. *Microscopia Eletrônica de Varredura acoplado ao Detector de Energia Dispersiva*

Para visualizar melhor a estrutura do sulfeto de estanho, realizou-se uma análise microscópica da superfície da amostra. A resolução da imagem foi de 3,5 nm e ampliação de 40 a 45 vezes. O detector de energia dispersiva foi utilizado para identificar os elementos contidos na amostra.

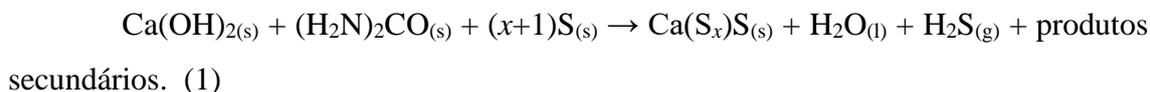
#### 3.2.2.5. *Difração de Raio X*

Realizou-se a difração de raio X dos produtos formados na superfície da amostra de estanho, sendo eles retirados da amostra com uma raspagem simples. Para a análise, definiu-se o ângulo de varredura de 10 a 60°, tipo  $2\theta$ , velocidade de 1° por minuto e passo de 0,02 segundos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Síntese da água de enxofre

A água de enxofre é sintetizada através da reação entre o hidróxido de cálcio (cal hidratada) e enxofre em pó, sob meio básico (ureia), de acordo com a equação a seguir:



Segundo Borges *et al* (2020),  $x$  pode assumir o valor de 2, 4 ou 5.

Nota-se que a ureia não participa da formação do polissulfeto. Os produtos secundários da reação possivelmente estão relacionados à decomposição da ureia. Em solução, a ureia se decompõe em temperatura acima de 85 °C, conforme equação a seguir:



Desse modo, a decomposição da ureia torna o meio básico, com a liberação de íons  $\text{OH}^-$ .

Segundo informações da literatura moderna, o polissulfeto de cálcio é sintetizado sem o uso da ureia (EMBRAPA, 2007). Sua aplicação na agricultura é como fertilizante – porque o enxofre e o cálcio ajudam no crescimento das plantas – e no controle de pragas. Além desta aplicação, também é usado na remediação de solos contaminados com cromo IV, reduzindo-o para hidróxido de cromo (LI; ZHANG, 2021) e no Japão é vendido como sal de banho, formando uma solução coloidal (OHKUBO; KONDO; NAGASAKI, 2020).

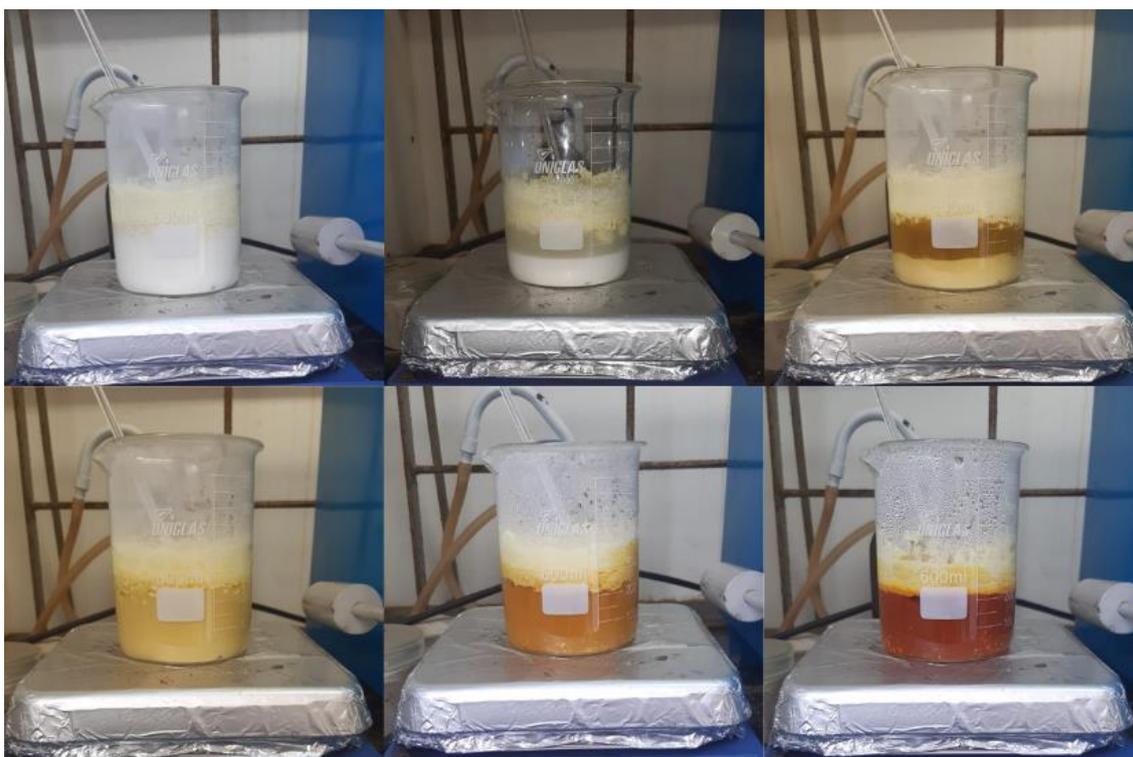
O enxofre é insolúvel em água e há um excesso de hidróxido de cálcio, notável pela presença de precipitado – grande parte do hidróxido de cálcio não foi solubilizado na água. A solubilidade da cal hidratada em água é de 0,185 g/100 cm<sup>3</sup>, enquanto, na solução, esse valor é facilmente superado.

A reação se inicia quando a solução chega a 90 °C. Alcançada essa temperatura, ela se mantém estável durante toda a reação. Além disso, 90 °C é a temperatura máxima que a solução atinge, independentemente do quão intenso seja o aquecimento proporcionado pela chapa aquecedora. A temperatura é um fator importante porque está relacionada ao aumento da energia cinética da reação. Quanto maior a temperatura, maior

a energia cinética das moléculas, de modo que aumenta a taxa de colisões entre os reagentes e ocasiona em um maior sucesso da reação.

O enxofre reage aos poucos, e a solução se torna avermelhada com o aumento da concentração de polissulfeto formado. A reação acontece sem necessidade de agitação, porém, durante a reação, é possível observar a formação de bolhas no fundo do béquer, que eclodem do meio da cal, ajudando a misturar os reagentes.

Figura 10 – Etapas da formação do polissulfeto de cálcio.

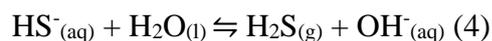
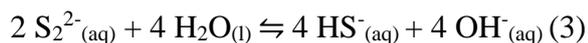


Fonte: Acervo pessoal.

A respeito da adição de reagentes, acrescentar a cal ou o enxofre primeiro à solução não apresenta diferença significativa, porém, a reação ocorre mais rapidamente se a ureia for o primeiro reagente adicionado. Deixar a água ferver antes de adicionar os reagentes também influencia na velocidade da reação.

Dois parâmetros interferem simultaneamente na reação: a degradação da ureia e a presença de íons hidróxido. A ureia degrada acima da temperatura ambiente, portanto, se a água estiver fervida antes do seu acréscimo, a ureia se decompõe mais rápido. Com a decomposição da ureia, aumenta a presença de hidróxidos no meio e o enxofre reage.

Segundo Ohlweiler (1976), a reação envolvendo o enxofre ocorre da seguinte forma:



O enxofre não reage de imediato porque é apolar (neutro) e a água é polar, necessitando de estar em sua forma bivalente para reagir. Também é por isso que a reação ocorre lentamente (independente da ureia), já que depende da dissociação do hidróxido de cálcio que fornece a maioria dos íons hidróxido para o enxofre reagir. O hidróxido de cálcio é uma base forte, portanto, se dissocia completamente.

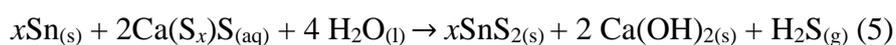
De acordo com as observações experimentais, a ordem mais eficaz para a síntese do polissulfeto de cálcio é ferver a água separadamente, adicionar a ureia, esperar alguns minutos para a ureia decompor, e, por último, adicionar a cal e o enxofre - ou acrescentar o enxofre primeiro e depois a cal, pois, como discutido anteriormente, a ordem entre esses dois reagentes é irrelevante. Seguindo essa ordem, a reação acontece até 50% mais rápida.

Uma solução de polissulfeto de cálcio tem pH em torno de 9,7. Entretanto, como há degradação da ureia nessa síntese, há a possibilidade de a solução apresentar um pH ainda mais alto. Usando uma fita de pH universal, observou-se que o pH da solução estava entre 12 e 13.

A formação do polissulfeto de cálcio não é completa, tendo em vista que há presença de precipitado durante toda a reação. Em poucos minutos de repouso, ocorre a decantação dos produtos secundários e/ou reagentes excessivos. Não houve a identificação dos produtos decantados por ser uma matriz complexa – quanto maior a quantidade de substâncias, mais difícil separá-las e identificá-las.

#### 4.2. Síntese do ouro alquímico

A síntese do ouro alquímico acontece pela reação do polissulfeto de cálcio com a superfície da amostra de estanho, conforme explicado por Borges et al (2020), tendo  $x$  um valor variável.



De acordo com a equação, o produto dourado formado é o sulfeto de estanho IV, com fórmula molecular  $\text{SnS}_2$ . O sulfeto de estanho IV é pouco solúvel em água, visível pela presença de precipitado. O sulfeto não tem forte interação com a superfície metálica, motivo pelo qual ele decanta ao invés de aderir à superfície. Entretanto, com tempo

suficiente, o sulfeto pode formar uma fina camada no estanho. O processo é demorado devido a estabilidade dos estados de oxidação do estanho. De acordo com Cotton *et al* (1999), a ordem de estabilidade geralmente é:  $\text{Sn}^{2+} > \text{Sn}^0 > \text{Sn}^{4+}$ , de modo que a formação do sulfeto de estanho IV seja prejudicada por forçar o estado menos estável.

Antes da produção do sulfeto de estanho IV ( $\text{SnS}_2$ ), há a formação do sulfeto de estanho II ( $\text{SnS}$ ). Esse produto intermediário é esperado tendo em vista que a energia de ligação do  $\text{Sn}^{+2}$  é menor que a energia de ligação para o  $\text{Sn}^{+4}$ . O processo de oxidação do estanho exige mais tempo e maior energia.

No início da síntese, a amostra obtém aparência esbranquiçada. Isso se deve a deposição de cal e/ou formação de óxidos de estanho na superfície. Tanto o óxido de estanho ( $\text{SnO}$ ) quanto o dióxido de estanho ( $\text{SnO}_2$ ) se apresentam na cor branca. Nessa etapa também é possível observar a formação do sulfeto de estanho II, pela presença de traços de cor marrom na amostra.

Figura 11 – Amostra de estanho no início do tratamento com polissulfeto de cálcio.



Fonte: Acervo pessoal.

Na segunda etapa, a amostra apresenta uma casca amarelada. A hipótese mais viável é a deposição excessiva de enxofre que não foi solubilizado ou a formação de sulfeto de estanho IV não cristalino.

Figura 12 – Amostra de estanho na metade do tratamento com polissulfeto de cálcio.



Fonte: Acervo pessoal.

Na terceira etapa, é possível observar uma fina camada dourada na superfície do estanho. Esse é o sulfeto de estanho IV cristalino (conforme identificado pela difração por raios X, melhor discutido na seção 4.3.5), com brilho metálico semelhante ao ouro.

Figura 13 – Amostra de estanho tratada com polissulfeto de cálcio.



Fonte: Acervo pessoal.

Na figura (13) acima, é possível observar o sulfeto de estanho IV na superfície do estanho (as pequenas manchas douradas, à esquerda), o excesso do sulfeto de estanho IV cristalino, formando uma camada ao redor da amostra (metade esquerda da amostra, onde tem resquícios de brilho), o sulfeto de estanho II (coloração marrom da amostra) e excesso de sulfeto de estanho IV não cristalino (metade direita da amostra). A formação do sulfeto cristalino obedeceu a estrutura da superfície do estanho, como pode ser visto na imagem a seguir.

Figura 14 – Amostra de estanho sem pré-tratamento (à esquerda) e estanho após lavagem com ácido clorídrico (à direita).



Fonte: Acervo pessoal.

O estanho foi tratado com ácido clorídrico para retirar quaisquer tipos de contaminações as quais ele possa ter sido exposto, visando solubilizar possíveis óxidos

que estejam na superfície. Após a lavagem com ácido forte, foi possível observar a superfície rugosa do estanho. Como cada grão está em uma posição diferente, é difícil capturar em uma única imagem todas as estruturas cristalinas formadas, de modo que, na figura 13, apareça menos regiões douradas do que realmente tem.

Devido à aparência dourada da amostra após o tratamento com o polissulfeto de cálcio, pode-se afirmar que foi sintetizado o ouro alquímico.

### 4.3. Caracterização

Foram realizados testes de caracterização para identificar a composição do ouro alquímico produzido. Os testes escolhidos levam em consideração as características físico-químicas do ouro. Todas as técnicas utilizadas podem ser aplicadas para verificar a ausência ou presença de ouro em amostras no geral.

#### 4.3.1. Densidade

A densidade é uma característica específica de cada substância, a qual consiste na relação entre a massa e o volume. A temperatura e a pressão são dois parâmetros que podem variar a densidade da substância de interesse. A densidade pode ser calculada utilizando-se a seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (6)$$

A fórmula acima não pôde ser usada diretamente porque o volume não poderia ser calculado facilmente devido às irregularidades da amostra, de modo que se fez necessário uma adaptação nos cálculos. Para encontrar o resultado mais fidedigno possível, adicionou-se o Princípio de Arquimedes ao cálculo da densidade.

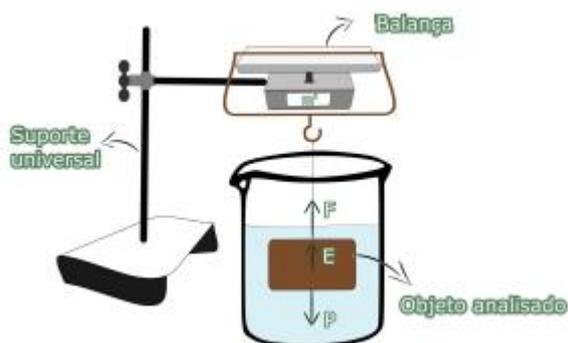
Sabe-se que o empuxo (E) é a força gerada sobre um corpo quando ele desloca um volume (v) de fluido, ambos sob a atuação da aceleração da gravidade (g). A força empuxo é dada por:

$$E = \rho_{fluido} g v_{deslocado} \quad (7)$$

Quando a amostra está em equilíbrio no sistema, há três forças atuando no corpo: a força peso (P), para baixo, dada pela massa real da amostra (m) multiplicada pela aceleração da gravidade; a força empuxo (E), para cima, calculada pela equação (7); e a

força de tração ( $F$ ) exercida pelo fio, correspondente à massa da amostra submersa ( $m_{\text{submersa}}$ ) multiplicada pela aceleração da gravidade. As forças estão representadas na figura (15) abaixo.

Figura 15 – Representação esquemática das forças atuantes na amostra.



Fonte: Silva e Fonseca (2021).

Devido a condição de equilíbrio, o somatório das forças atuando na amostra deve ser igual à zero, de modo que pode-se escrever a relação a seguir:

$$E = P - F \quad (8)$$

Substituindo as informações acerca do cálculo das forças  $F$  e  $P$  na equação (7), e, em seguida, rearranjando os termos, temos que:

$$v_{\text{deslocado}} = \frac{m - m_{\text{submersa}}}{\rho_{\text{fluido}}} \quad (9)$$

O fluido utilizado no experimento foi a água, e o volume deslocado da água é igual ao volume da amostra, de modo que, associando as equações (7) e (9) temos:

$$\rho_{\text{amostra}} = \frac{m - \rho_{\text{água}}}{m - m_{\text{submersa}}} \quad (10)$$

Aplicando a fórmula para os valores de massa igual a 8,53 g, massa submersa igual a 7,36 g e densidade da água a 27 °C igual a 0,9965 g cm<sup>-3</sup>, determinou-se a densidade da amostra em 6,44 g cm<sup>-3</sup>. Esse valor é muito diferente da densidade do ouro encontrada na literatura, sendo 19,3 g cm<sup>-3</sup>. Consultando a literatura, observa-se que a

densidade da amostra é mais próxima do estanho, sendo  $7,18 \text{ g cm}^{-3}$ . A partir desse resultado, pode-se chegar a duas conclusões: a primeira é que a amostra não se trata de ouro, ou de uma mistura com ouro, pois uma pequena porcentagem em massa de ouro ocasionaria em um grande aumento na densidade da amostra; a segunda conclusão é que apesar da visível formação do sulfeto de estanho IV, nota-se que nem toda a amostra foi convertida no sulfeto. A densidade do sulfeto de estanho é de  $4,5 \text{ g cm}^{-3}$ , consideravelmente menor que a densidade encontrada.

#### 4.3.2. Dureza

A dureza é uma das características que ajudam a identificar um mineral. O ouro tem dureza de 2,5 a 3 na escala de Mohs, portanto, o teste de dureza foi realizado com a fluorita, que tem dureza maior (4). Caso a região dourada seja ouro, espera-se que a fluorita seja o suficiente deformatar a amostra, devido ao seu caráter maleável.

Figura 16 – Amostra após atrito com a fluorita.



Fonte: Acervo pessoal.

Após o atrito com a fluorita, observou-se a presença de um risco na amostra (à esquerda), ao invés de uma deformação. Isso significa que a amostra é menos dura que a fluorita, porém não é maleável. Desse modo, pelo teste de dureza, conclui-se que a amostra testada não se trata do ouro.

#### 4.3.3. Reação com ácido clorídrico

O ouro é conhecido por sua natureza estável, de modo que é resistente à oxidação e à corrosão. O ouro pode ser dissolvido com a utilização da água-régia (mistura de ácido clorídrico e ácido nítrico, na proporção 3:1), de modo que apenas o contato com um dos ácidos não é o suficiente para afetar sua superfície.

Após gotear o ácido clorídrico concentrado na amostra, verificou-se que houve reação química, evidenciada pela efervescência e mudança de cor da amostra. Desse modo, conclui-se que a amostra não contém ouro naquela região.

Figura 17 – Amostra após reação com ácido clorídrico.



Fonte: Acervo pessoal.

Na literatura, é descrito que o sulfeto de estanho reage com ácido clorídrico, formando o cloreto de estanho.



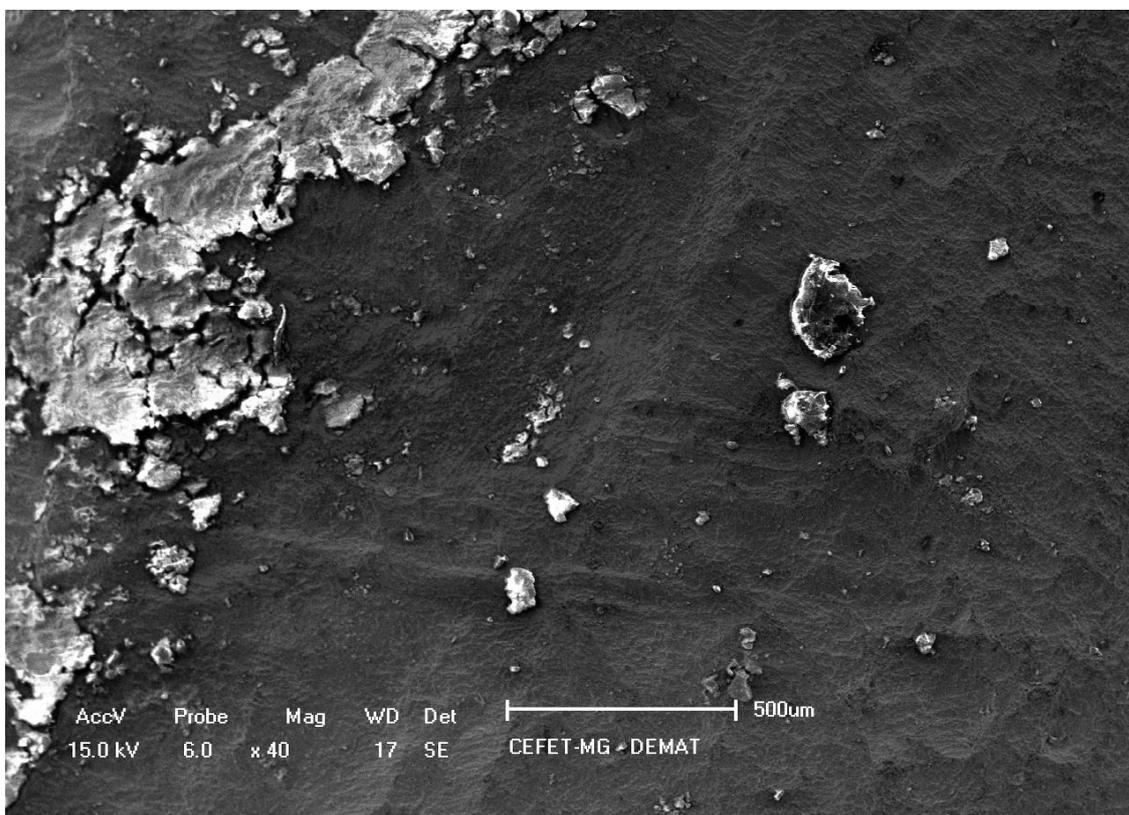
Desse modo, conclui-se que a mudança de cor observada na reação da amostra com o ácido clorídrico diz respeito à formação de cloreto de estanho IV.

#### 4.3.4. Microscopia Eletrônica de Varredura acoplado ao Detector de Energia Dispersiva

Através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) é possível observar a superfície da amostra de modo mais detalhado, analisando as imperfeições de regiões específicas.

A primeira região analisada foi onde observava-se a olho nu a coloração dourada da amostra.

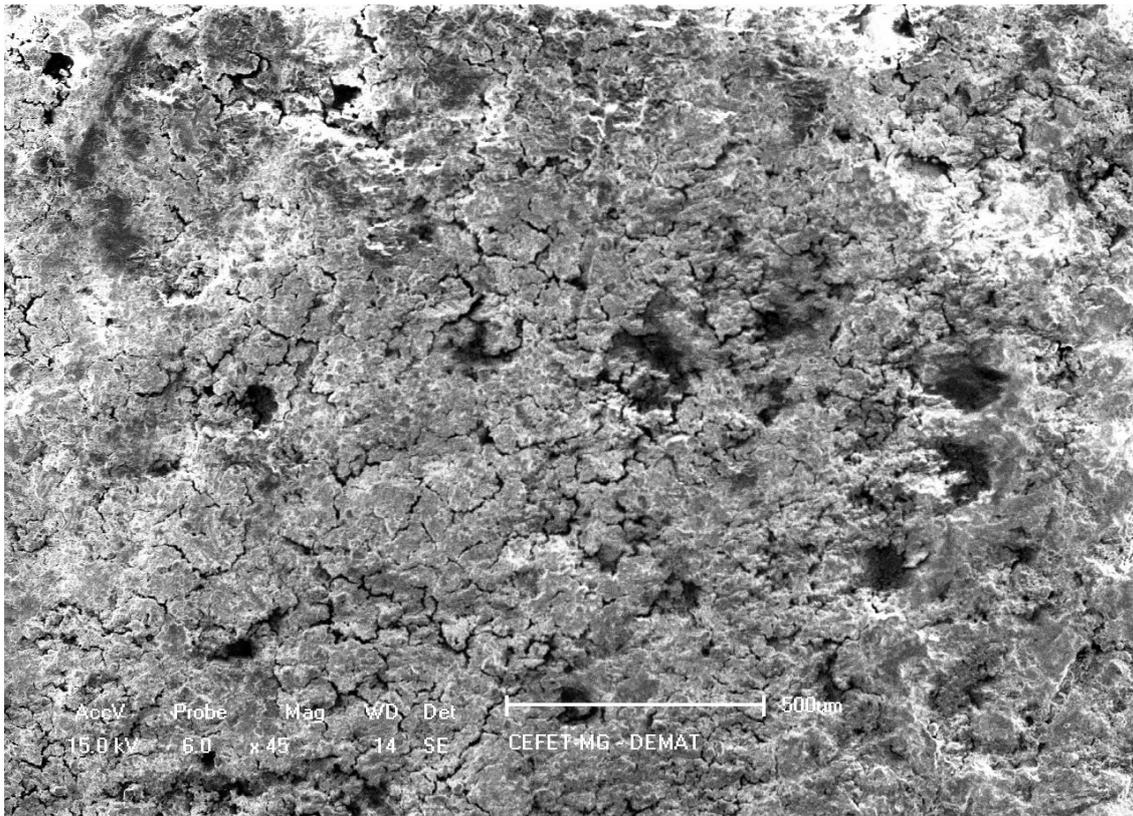
Figura 18 - Análise MEV da região cristalina da amostra.



Através da imagem, pode-se concluir que o “dourado” da amostra é apenas superficial. Isso evidencia, mais uma vez, que a conversão do estanho não foi completa.

A segunda região analisada foi onde estava a deposição amarelada de sulfeto e enxofre.

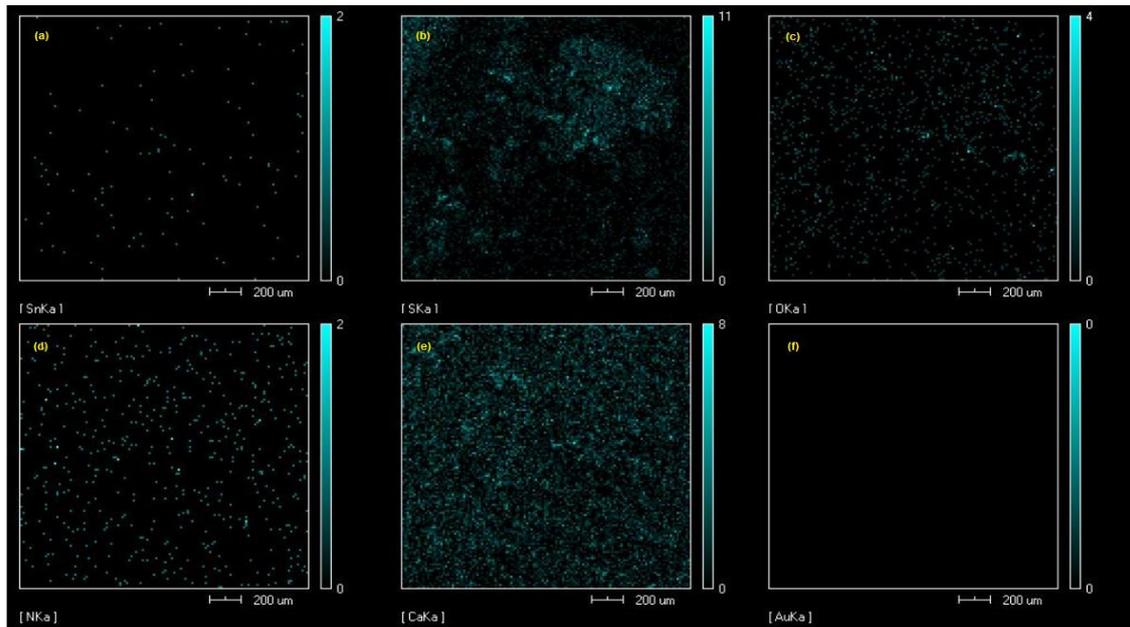
Figura 19 - Análise MEV da região amorfa da amostra.



Percebe-se que não há formação cristalina de substâncias nesse local devido à estrutura amorfa visualizada na imagem.

Com o detector de energia dispersiva (EDS), pôde-se identificar os elementos contidos na amostra. Os resultados do EDS mostram que os elementos que a amostra possui são estanho, enxofre, oxigênio, nitrogênio e cálcio.

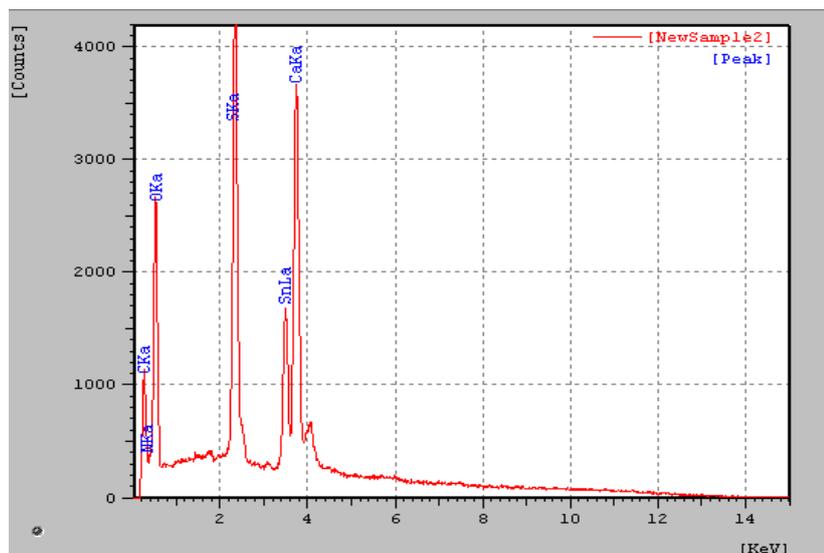
Figura 20 – Análise EDS com a concentração de (a) estanho, (b) enxofre, (c) oxigênio, (d) nitrogênio, (e) cálcio e (f) ouro na amostra.



Todos esses elementos estão dentro do esperado: o estanho proveniente da amostra metálica inicial; o enxofre que foi colocado sob a forma de pó no início da síntese; o cálcio e o oxigênio advindos da cal hidratada; e o nitrogênio obtido através da ureia.

As concentrações de cada elemento também estão de acordo com a estequiometria das reações apresentadas nas seções 4.1 e 4.2. O gráfico a seguir detalha melhor a concentração de cada elemento.

Gráfico 1 – Espectro do EDS.

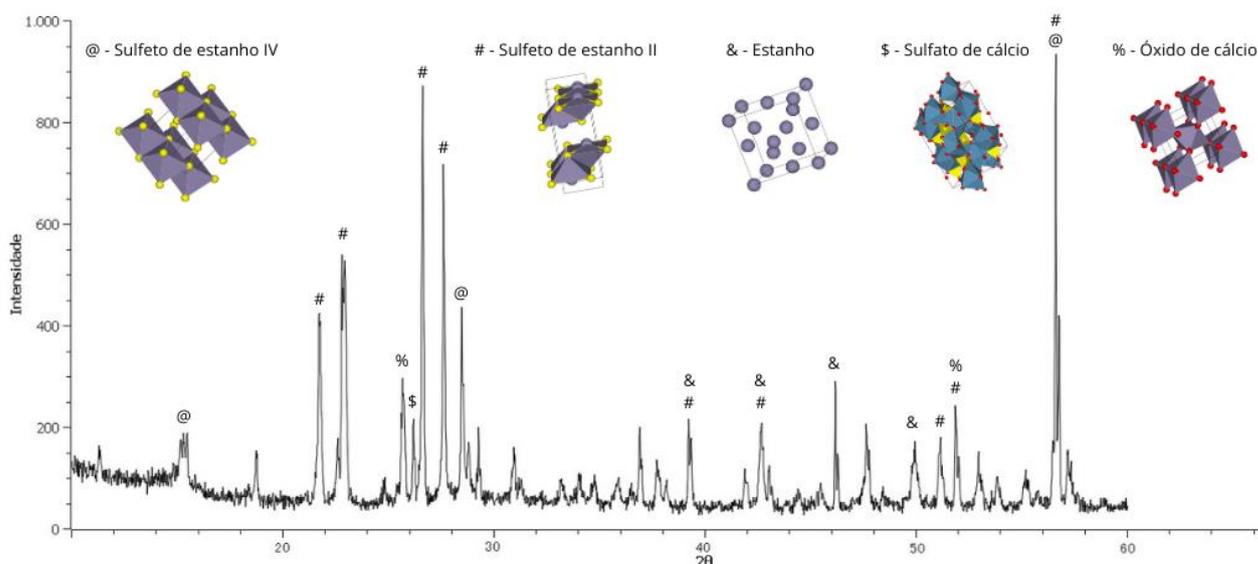


Apesar de ter sido realizada a varredura a procura do ouro, esse elemento não foi encontrado. Desse modo, a análise MEV-EDS confirma a ausência de ouro na amostra.

#### 4.3.5. Difração por Raio X

Com o experimento de difração por raio X, obteve-se o seguinte difratograma, plotado no programa SciDAVis:

Gráfico 2 - Difratograma de raio X da amostra.



De acordo com difratogramas encontrados na literatura, os picos encontrados no difratograma se referem, principalmente, ao  $\text{SnS}_2$ ,  $\text{SnS}$  e  $\text{Sn}$ , que são as três fases esperadas de acordo com as equações químicas apresentadas ao longo da discussão. Com o DRX também se identificou picos prováveis de sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ) e óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), produtos secundários que acredita-se terem sido formados durante a síntese de polissulfeto de cálcio.

Conclui-se que a amostra analisada não está completamente cristalina ao observar as irregularidades na linha base do difratograma, característica já evidenciada pela análise MEV. Esse resultado é esperado devido às condições adversas para a formação e cristalização do sulfeto de estanho IV.

## 5. CONCLUSÃO

Os testes de caracterização contestam a ideia alquímica de transmutação de metais em ouro. Observou-se que o produto reage quimicamente com o ácido clorídrico, apresenta risco com o teste de dureza e possui densidade semelhante ao estanho metálico. Com o detector de energia dispersiva (EDS), foi possível confirmar a ausência de ouro; complementarmente, com a difração de raio X, determinou-se que o produto dourado formado se tratava essencialmente de uma mistura de sulfeto de estanho II ( $\text{SnS}$ ), sulfeto de estanho IV ( $\text{SnS}_2$ ).

Através dos experimentos, constata-se que o ouro alquímico tem apenas a cor e o brilho metálico semelhante ao ouro metálico. Numa época onde havia escassez de informações e as mudanças de cor e odor, majoritariamente, guiavam os experimentos, era plausível que os alquimistas acreditassem que estavam no caminho certo para transformar o estanho em ouro.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFONSO-GOLDFARB, Ana Maria. **Da Alquimia à Química: um estudo sobre a passagem do pensamento mágico-vitalista ao mecanicismo**. 3. ed. São Paulo: Landy Editora, 2005. 248 p.

BARBIERI, Pedro. Zósimo de Panópolis e a alquimia antiga: uma introdução. **Sacrilegens**, Juiz de Fora, v. 19, n. 2, p. 11-28, jul. 2022.

BORGES, Pedro et al. ALQUIMIA EXPERIMENTAL. **Química Nova**, [S.L.], v. 9, n. 43, p. 1-12, set. 2020. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170604>.

CÂNDIDO, Raphaela. Roger Bacon: a alquimia como ciência positiva. **Perspectivas**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 207-218, 15 jul. 2022. Universidade Federal do Tocantins. <http://dx.doi.org/10.20873/rpv7n1-36>.

CHATTOPADHYAY, T.K.; PANNETIER, J.; VON SCHNERING, H.G. Neutron diffraction study of the structural phase transition in Sn S and Sn Se. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, 1986, 47, 879-885.

CHASSOT, Attico I. Alquimiando a Química. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 20-23, maio 1995.

COSTA, Fernando Rocha da; BENITE, Anna M. Canavarro. CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS-TECNOLÓGICAS D. In: 20º ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE QUÍMICA, 20., 2020, Recife. **ENEQ Pernambuco - UFRPE/UFPE**. Recife. p. 1-9.

COTTON, F. Albert *et al.* **Advanced Inorganic Chemistry**. 6. ed. New York: Willey-Interscience, 1999. 1368 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Calda Sulfocálcica: preparo e indicações**. **Pac Embrapa**, Dourados, v. 1, p. 28-30, out. 2007.

FILSO, M O; EIKELAND, E.; ZHANG, J.; MADSEN, S. R.; IVERSEN, B. B. Atomic and electronic structure transformations in SnS<sub>2</sub> at high pressures: a joint single crystal X-ray diffraction and DFT study. **Dalton transactions** (Cambridge, England: 2003), 2016, 45, 3798-3805.

FIORILLO, Celso Antônio Pacheco. A EXTRAÇÃO DO OURO POR PARTE DAS EMPRESAS TRANSNACIONAIS EM FACE DO DIREITO AMBIENTAL CONSTITUCIONAL BRASILEIRO. **Revista Direitos Culturais**, Santo Ângelo, v. 18, n. 44, p. 19-39, jan. 2023. <http://dx.doi.org/10.20912/rdc.v18i44.1296>.

FORSTER, Regula. La transferencia del conocimiento secreto: tres diálogos árabes de alquimia. **Al-Qanṭara**, [S.L.], v. 37, n. 2, p. 399, 24 mar. 2017. Editorial CSIC. <http://dx.doi.org/10.3989/alqantara.2016.013>.

GALLITELLI, P. Ricerche sul solfato di calcio semidrato e sull'anidrite solubile. **Periodico di Mineralogia**, 1933, 4, 132-171.

GUERCIO, Maria Rita. “Da Alquimia à Química: a representação dos alquimistas nas pinturas de gênero holandesas do Século XVII (Coleção Eddleman and Fisher do Centro da História da Ciência da Filadélfia)”. **Khronos, Revista de História da Ciência**, nº10, pp. 65-78. 2020. Disponível em <<http://revistas.usp.br/khronos>>. Acesso em 11/01/2024.

HOFMANN, W. Ergebnisse der Strukturbestimmung komplexer Sulfide. I: SnS und PbSnS<sub>2</sub>. **Zeitschrift fuer Kristallographie, Kristallgeometrie, Kristallphysik, Kristallchemie (-144,1977)**, 1935, 92, 161-173.

INSTITUTO ESCOLHAS. “**Raio X do Ouro: mais de 200 toneladas podem ser ilegais**”. São Paulo, 2022.

JUNQUEIRA, Jéssica Sousa Santos *et al.* Ouro. **Química Nova na Escola**, [s. l], v. 34, n. 1, p. 45-46, fev. 2012.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Perfil do Ouro**. 2009. 50 p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Economia Mineral do Ouro**. São Paulo: A, 2023. 64 p.

LI, Yuan Yuan; ZHANG, Ting Ting. Stability Properties of Chromium in Cr(VI)-Contaminated Soil Stabilized by Calcium Polysulfide (CaS<sub>5</sub>). **Nature Environment And Pollution Technology**, [S.L.], v. 20, n. 1, p. 377-383, 1 mar. 2021. Technoscience Publications. <http://dx.doi.org/10.46488/nept.2021.v20i01.044>.

LIMA, Tânia Andrade; SILVA, Marília Nogueira da. Alquimia, Ocultismo, Maçonaria: o ouro e o simbolismo hermético dos cadinhos (séculos XVIII e XIX). **Anais do Museu Paulista**, São Paulo, v. 9, n. 8, p. 9-54, nov. 2003.

LOBATO, Lydia Maria; COSTA, Marco Aurélio da. Ouro. **Recursos Minerais de Minas Gerais**, Belo Horizonte, p. 1-23, out. 2018.

LOMBARDE, Washington; KIOURANIS, Neide Maria Michellan. A ALQUIMIA E OS CAMINHOS PERCORRIDOS PARA A INCORPORAÇÃO DA QUÍMICA COMO CIÊNCIA MODERNA. **Ensino de Ciências e Tecnologia em Revista – Encitec**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 65-85, 1 jun. 2021. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões. <http://dx.doi.org/10.31512/encitec.v11i1.382>.

LUCA, Anelise Grünfeld de; WALZ, Gabriel Cristiano. Teoria do Flogisto: uma abordagem didática para o ensino de reações químicas no 9º ano do ensino fundamental. **História da Ciência e Ensino: construindo interfaces**, [S.L.], v. 22, p. 29-46, 26 dez. 2020. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP). <http://dx.doi.org/10.23925/2178-2911.2020v22p29-46>.

OFTEDAL, I. Die Kristallstruktur von Sn S<sub>2</sub>. **Norsk Geologisk Tidsskrift**, 1926. 9, 225-233.

OHKUBO, Eriko; KONDO, Takeshi; NAGASAKI, Yasushi. An autopsy case of corrosive gastritis caused by calcium polysulfide colloid preparation. **Journal Of Toxicologic Pathology**, [S.L.], v. 33, n. 4, p. 287-290, 2020. Japanese Society of Toxicologic Pathology. <http://dx.doi.org/10.1293/tox.2020-0036>

OHLWEILER, Otto Alcides. **Química Analítica Quantitativa**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1976. 1039 p.

OLIVEIRA, T. A. L. de; BUFFOLO, A.C. C.; & CALIXTO, V. dos S. (2019). Alquimia em História da Química: uma análise qualitativa da presença de estudos sobre o tema em periódicos nacionais de ensino de Química. **Revista Debates Em Ensino De Química**, 5(1), 86–95.

PARDO, Juan Quílez. Aproximación a los orígenes de la química moderna. **Educación Química**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 45-55, 26 ago. 2018. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. <http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2002.1.66319>.

PÉREZ-BUSTAMENTE, Juan Antonio. Por la alquimia a la química. **Paradigma: Revista Universitaria de Cultura**, Málaga, v. 4, n. 1, p. 23-29, jan. 2007.

PRADO, Letícia do; CARNEIRO, Marcelo Carbone. O episódio histórico das teorias do flogisto e calórico: criando interfaces entre a história e filosofia da ciência e o ensino de química na busca pela humanização do trabalho científico. **História da Ciência e Ensino: construindo interfaces**, [S.L.], v. 18, p. 153-180, 28 nov. 2018. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP). <http://dx.doi.org/10.23925/2178-2911.2018v18p153-180>.

PRINCIPE, Lawrence M. **The Secrets of Alchemy**. Chicago: The University Of Chicago Press, 2013. 296 p.

ROBLES, Juvencio; BRIBIESCA, Lucio. En busca de la Piedra Filosofal: O ¿debería todo químico moderno saber algo de alquimia? Parte II: Historia de la alquimia como búsqueda de conocimiento y práctica. **Educación Química**, Guanajuato, v. 16, p. 338-347, abr. 2004.

SANTOS, Soledad Esteban. Historia de la alquimia I: la alquimia griega. **Real Sociedad Española de Química**, Madrid, v. 1, n. 1, p. 60-67, 12 jun. 2006.

SCHIMEK, George L.; DRAKE, Greg W.; KOLIS, Joseph W. Crystal Structure of Calcium Heptaamine Hexasulfide,  $\text{Ca}(\text{NH}_3)_7\text{S}_6$ . **Acta Chemica Scandinavica**, 1999, 53, 145-148.

SCHNERING, H. G.; WIEDEMEIER, H. The high temperature structure of beta-SnS and beta-SnSe and the B16-to-B33 type gamma-transition path Sample: T = 905 K. **Zeitschrift fur Kristallographie**, 1981, 156, 143-150.

STROHMAIER, Gotthard. Elixir, alquimia y las metamorfosis de dos sinónimos. **Al-Qanṭara**, [S.L.], v. 37, n. 2, p. 423, 24 mar. 2017. Editorial CSIC. <http://dx.doi.org/10.3989/alqantara.2016.014>.

VANIN, José Atílio. **Alquimistas e químicos: o passado, o presente e o futuro**. 2. ed. São Paulo: Moderna, 2005. 119 p.

VAZ, J. G.; CARNEIRO, V. A. Escala de Mohs: o grau de dureza dos minerais dos estojos didáticos do acervo da SEGEP – Seção de Geologia e Paleontologia da UEG/CCET. **Percursos**, Maringá, v. 8, n. 2, p. 27-57, 2016.

WYCKOFF, R. W. G. Second edition. Interscience Publishers, New York, New York. **Crystal Structures**, 1963, 1, 7-83.