

RAFAEL GALETTI PIMENTA

**Recuperação do alumínio contido na drossa branca através de
flotação**

São Paulo

2011

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais da
Escola Politécnica da USP

RAFAEL GALETTI PIMENTA

**Recuperação do alumínio contido na drosse branca através de
flotação**

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Como quesito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalurgista

São Paulo

2011

RAFAEL GALETTI PIMENTA

**Recuperação do alumínio contido na drossa branca através de
flotação**

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Para obtenção do título de Engenheiro Metalurgista

Área de Concentração:
Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador:
Professor Doutor Jorge Alberto Soares Tenório

São Paulo

2011

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer àqueles que, sem os quais, este trabalho não seria possível:

- À Maria Stella, pelo apoio nas horas difíceis e pela revisão do texto;
- Ao Alfredo, por toda a ajuda durante as experiências de flotação e limpeza superficial;
- Ao Benedito, por ter fornecido o material para realização da flotação, juntamente com informações importantes, que ajudaram em outros aspectos do trabalho;
- Ao Professor Doutor Jorge Tenório, pela oportunidade de fazer este trabalho;
- Ao Vinícius, por ter realizado a espectroscopia.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estudar a viabilidade da recuperação do alumínio a partir da drosse branca. Em um mundo cada vez mais preocupado com o meio ambiente, a reciclagem é uma alternativa de grande importância, na medida em que os impactos ambientais diminuem drasticamente. Atualmente, existe um procedimento eficiente para a recuperação de grande parte de alumínio proveniente da drosse branca, através da moagem. Entretanto, o particulado mais fino, ainda relativamente rico em alumínio, não é desconsiderado. Para tanto, fez-se o estudo do mecanismo de reciclagem do alumínio e da flotação. Os ensaios foram feitos em escala laboratorial, usando célula de flotação, agitador, estufa e peneiras. O reagente de flotação utilizado foi o amil-xantato. Os resultados mostraram que a flotação do alumínio é possível após uma preparação prévia, com CuSO_4 , depositando cobre na superfície do alumínio. Fez-se também, uma análise da quantidade ótima de reagentes a ser adicionada. Porém, a quantidade recuperada é muito inferior a outro trabalho, onde flotou-se apenas alumínio em pó.

Palavras-chave: flotação, alumínio, reciclagem, drosse branca, xantato.

ABSTRACT

This work aims to study the viability of the recovery of aluminum from the white dross. In a world increasingly concerned with the environment, recycling is an alternative of great importance, as it drastically reduces the environmental impacts. Currently, there is an efficient procedure that can recover the majority of the aluminum from the white dross by grinding. However, the finer particles are still relatively rich in aluminum, is neglected. As such, there is the study of the mechanism of recycling aluminum and flotation. The tests were performed on a laboratory scale, using flotation cell, stirrer, oven and screens. The flotation reagent used was amyl-xanthate. The results showed that flotation of aluminum is possible after a prior preparation, with CuSO_4 , depositing copper on the surface of aluminum. There was also an analysis of the optimum amount of reagent to be added. However, the amount recovered is much lower than another study, where only aluminum powder was analyzed.

Keywords: flotation, aluminum, recycling, white dross, xanthate.

Sumário

1. Introdução teórica	1
1.1 – Alumínio	1
1.1.1 – Reciclagem do Alumínio	6
1.1.2 – Metalurgia Secundária do Alumínio	7
1.2 – Flotação	8
1.2.1 – Coletores, ativadores, depressores e espumantes.....	10
1.2.2 – Química de interface	11
1.2.2.1 – Termodinâmica de interface.....	13
1.2.2.2 – Flotação e hidrofobicidade.....	16
1.2.2.3 – Granulometria e a flotação	17
1.2.3 – Xantatos	18
1.2.4 – Flotação do alumínio	20
1.3 – WDS (Espectroscopia por dispersão de onda).....	22
2. Objetivos.....	24
3. Materiais e Métodos	25
3.1 Peneiramento	25
3.2 Limpeza superficial da drosse	26
3.3 Deposição eletrolítica	26
3.4 Flotação utilizando amil-xantato	27
3.5 Medição do teor de alumínio e sua recuperação.....	28
4. Resultados.....	30
4.1 Peneiramento	30
4.2 Limpeza superficial e deposição eletrolítica	30

4.3 Flotação	32
4.4 Análise WDS	33
5. Conclusão	35
6. Sugestões para trabalhos futuros	36
Referências	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Fluxograma da produção de alumínio	5
Figura 1.2- Porcentagem de reciclagem de alumínio doméstico em 2008	6
Figura 1.3 – Indicação do ângulo de contato de uma gota de líquido com o sólido	9
Figura 1.4 - Ilustração de uma molécula de coletor	10
Figura 1.5 - Representação das ligações de hidrogênio.....	12
Figura 1.6 - Indução do dipolo elétrico	13
Figura 1.7 – Esquema do ângulo de contato com as tensões entre sólido, líquido e gás	16
Figura 1.8 - Cadeia carbônica representativa de um xantato.....	18
Figura 1.9 - Recuperação de alumínio em função do pH e do xantato usado	19
Figura 1.10 - Cinética de recuperação em função do óxido, para o octil-xantato e pH 8,5	20
Figura 3.1- Ilustração de um moinho de martelos	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Principais propriedades físicas do alumínio	1
Tabela 1.2 – Principais propriedades mecânicas do alumínio puro	2
Tabela 1.3 - Propriedades mecânicas do ferro.....	2
Tabela 1.4 - Consumo de alumínio de acordo com o setor. Unidades em 1000t	2
Tabela 1.5 - Produção de alumínio primário nos anos de 2009 e 2010. Unidades em 1000t.....	3
Tabela 1.6 - Parâmetros de consumo para produção de alumina	4
Tabela 1.7 - Insumos para produção de alumínio primário	4
Tabela 1.8 - Fontes de sucatas e suas impurezas.....	7
Tabela 1.9- Radicais com número de carbono correspondente e ângulo de contato.....	11
Tabela 3.1- Designação das amostras, junto com a quantidade de reagente adicionado	27
Tabela 3.2 - Quantidade de solução adicionada para cada etapa.....	28
Tabela 3.3 - Medidas antes da flotação	28
Tabela 4.1 - Granulometria da matéria prima.....	30
Tabela 4.2 - Tabela de resultado em função dos parâmetros apresentados	31
Tabela 4.3 - Massa recuperada da flotação.....	32
Tabela 4.4 – Resultado da análise WDS.....	33

1. Introdução teórica

1.1- Alumínio

O alumínio é o terceiro elemento mais presente na crosta terrestre e o metal mais abundante ⁽¹⁾, porém, ocorre na forma de óxido de alumínio, ou alumina, Al_2O_3 . Seu principal mineral é a Bauxita, que é uma mistura de hidróxido de alumínio; óxido de ferro; carbonatos de magnésio, cálcio e ferro; quartzo; caulim; compostos de titânio e ainda pequenas frações de outros metais, tais como cálcio, sódio, potássio, cromo, zircônio, fósforo, gálio e vanádio.

Tabela 1.1 – Principais propriedades físicas do alumínio ⁽¹⁾

Propriedades	
Estrutura cristalina	CFC
Peso atômico	26,98154
Massa específica a 20 C	2,6989 g/cm ³
Contração de solidificação	6,5 %
Temperatura de fusão	660,4 C
Temperatura de ebulição	2494 C
Coef. de dilat. térm. lin. 20 a 400 C	26,4
Calor específico a 25 C	900 J/kg.C
Calor latente de fusão	397 kJ/kg
Calor de combustão	31,07 MJ/kg
Condutibilidade elétrica volumétrica	64,94 % IACS
Condutibilidade térmica a 25 C	247 W/m.C

As principais características do alumínio estão mostradas na tabela 1.1. Com estas características, o alumínio é o segundo metal mais utilizado, atrás apenas do ferro ⁽¹⁾. Em comparação com este ⁽²⁾, podemos notar uma menor tensão de escoamento, juntamente com uma menor densidade, como se pode ver nas tabelas 1.1, 1.2 e 1.3 ⁽²⁾. Esta menor densidade faz com que o alumínio se torne uma opção mais viável, para aplicações onde o

peso reduzido é importante, como embalagens e transportes. Porém, costuma-se usar o alumínio em ligas, principalmente com o cobre (série comercial 2xxx), zinco (série comercial 7xxx) e o silício (série comercial 6xxx)⁽³⁾.

Tabela 1.2 – Principais propriedades mecânicas do alumínio puro⁽¹⁾

Propriedade	Recozido	Encruado a 90%
Limite de resistência	40 a 50 MPa	120 a 140 MPa
Limite de escoamento	15 a 20 MPa	100 a 120 MPa
Dureza Brinell	12 a 16 kgf/mm ²	27 kgf/mm ²
Alongamento	50 a 70 %	8 a 12 %

Tabela 1.3 - Propriedades mecânicas do ferro⁽²⁾

Propriedade	
Densidade	7,874 g/cm ³
Limite de escoamento	140 MPa
Dureza Brinell	110 ⁽⁴⁾ kgf/mm ²

O consumo do metal alumínio se distribui em cada setor de acordo com a tabela 1.4, e seus principais usos são⁽⁵⁾:

- Transportes, na forma de extrudados, chapas, laminados, forjados e fundidos;
- Bens de consumo, na forma de extrudados, chapas, laminados, forjados e fundidos;
- Construção civil, na forma de extrudados, chapas, laminados, pastas e pó;
- Embalagens, na forma de folhas, chapas e laminados;
- Indústria elétrica, na forma de fios e cabos;
- Máquinas e equipamentos, na forma de extrudados, chapas, laminados, forjados e fundidos.

Tabela 1.4 - Consumo de alumínio de acordo com o setor. Unidades em 1000t⁽⁶⁾

Tipos de Produtos	2007	2008	2009
Chapas	434,1-	461,7-	429,5-
Folhas	84,0-	83,9-	82,2-
Extrudados	199,9-	230,1-	204,8-
Fios e cabos	143,9-	152,8-	125,6-
Fundidos e forjados	191,2-	219,1-	180,3-
Pó	48,7-	46,7-	25,5-
Usos destrutivos	40,3-	40,2-	31,6-
Outros	21,6-	22,7-	17,2-
TOTAL	1.163,7-	1.257,2-	1.096,7-

Para fornecer alumínio para todas estas aplicações, algumas empresas concentram a maior parte da produção de alumínio primário no Brasil. A tabela 1.5 mostra o cenário de produção destas empresas nos anos de 2009 e 2010⁽⁷⁾:

Tabela 1.5 - Produção de alumínio primário nos anos de 2009 e 2010. Unidades em 1000t⁽⁶⁾

Empresas	2009		2010		Variação 2010/2009 (%)	
	Novembro	Jan-Nov	Novembro	Jan-Nov	Novembro	Jan-Nov
Albras (PA)	37,2	416,3	37,5	412,5	0,8	-0,9
Aicoa	26,5	298,0	29,1	320,5	9,8	7,6
Poços de Caldas (MG)	5,3	59,8	7,7	80,6	45,3	34,8
São Luís (MA)	21,2	238,2	21,4	239,9	0,9	0,7
BHP Billiton (MA)	14,1	158,5	14,2	158,6	0,7	0,1
Votorantim Metais – Companhia Brasileira de Alumínio (SP)	38,0	431,1	38,3	433,3	0,8	0,5
Novelis	7,9	92,1	7,3	84,2	-7,6	-8,6
Ouro Preto (MG)	4,0	44,1	4,0	44,4	0,0	0,7
Aratu (BA)	3,9	48,0	3,3	39,8	-15,4	-17,1
Valesul (RJ)	0,0	10,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	123,7	1.406,2	126,4	1.409,1	2,2	0,2

A produção do alumínio primário a partir da bauxita envolve os processos Bayer e Hall-Hérout.

O processo Bayer consiste em concentrar a alumina presente na bauxita através da adição de soda cáustica e aquecimento da solução. Após o resfriamento desta solução, as impurezas são separadas, restando alumina concentrada. A figura tabela 1.6 mostra o consumo de matéria prima para a produção de uma tonelada de alumina⁽⁸⁾.

Tabela 1.6 - Parâmetros de consumo para produção de alumina⁽⁸⁾

Insumos para a produção de alumina	
Bauxita (t/t)	1,85 a 3,4
Cal (kg/t)	10 a 50
Soda cáustica (kg/t)	40 a 140
Vapor (t/t)	1,4 a 4
Óleo Combustível – calcinação (kg/t)	80 a 130
Floculante sintético (g/t)	100 a 1000
Energia elétrica (kWh/t)	150 a 400
Produtividade (Hh/t)	0,5 a 3
Água (m³/t)	0,5 a 2

Já o processo Hall-Hérout consiste em reduzir o alumínio oxidado da alumina em um banho eletrolítico. A tabela 1.7 mostra o consumo de matéria prima para a produção de uma tonelada de alumínio⁽⁸⁾.

Tabela 1.7 - Insumos para produção de alumínio primário⁽⁸⁾

Insumos para a produção de alumínio primário	
Alumina (kg/t)	1919
Energia elétrica (MWh cc/t)	15
Criolita (kg/t)	8
Fluoreto de alumínio (kg/t)	19,7
Coque de petróleo (kg/kg)	0,384
Piche (kg/kg)	0,117
Óleo combustível (kg/t)	44,2

A produção do alumínio primário ocorre desde a mineração da bauxita. Após o transporte para usinas de moagem inicia-se o processo Bayer, no qual são realizadas digestão, filtragem e precipitação do concentrado de alumina. A alumina então é calcinada, perdendo a umidade estrutural. Após a calcinação, a alumina segue para a célula eletroquímica, onde, com a adição de elétrons, na forma de corrente contínua, e anodo de carbono, além de criolita, o alumínio oxidado da alumina é reduzido a alumínio metálico. O alumínio líquido é encaminhado a um forno, onde podem ser adicionados elementos de liga. Assim, conforme exemplifica o fluxograma da figura 1.1, são produzidos lingotes ou tarugos de alumínio, dependendo de sua aplicação final.

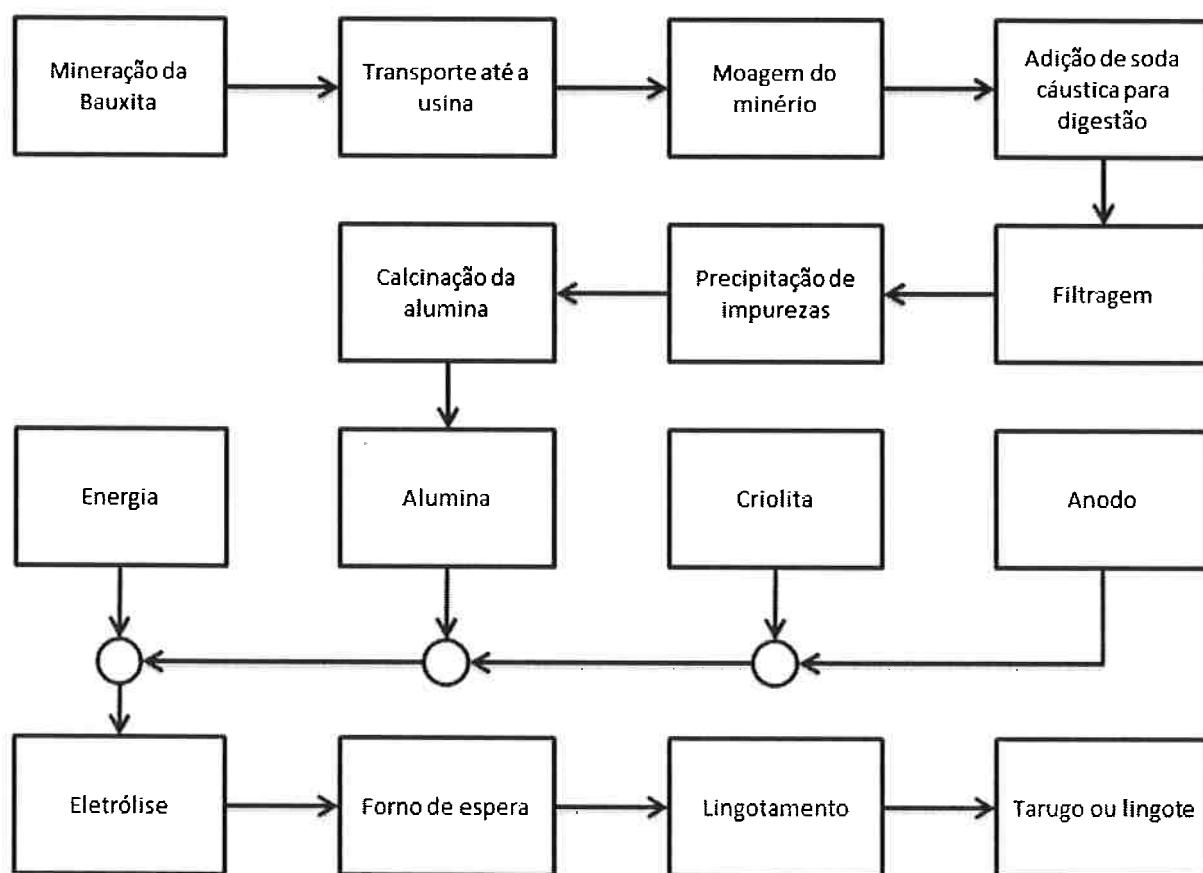


Figura 1.1 - Fluxograma da produção de alumínio⁽⁸⁾

1.1.1 - Reciclagem do Alumínio

A reciclagem visa diminuir os custos de obtenção do metal em questão com um menor custo de produção, o que envolve insumos materiais, mão de obra e energia, sendo esta térmica ou elétrica. No caso do alumínio, a produção de uma tonelada por metalurgia secundária requer aproximadamente 750 kWh, enquanto que para produzir a mesma quantidade por metalurgia primária, é necessário consumir 17000 kWh ⁽¹⁾. Sendo assim é possível obter, com a reciclagem, uma economia energética de até 95% na produção de alumínio.

Além de menores custos físicos, a metalurgia secundária do alumínio causa menor impacto ambiental, uma vez que para a produção de uma tonelada do alumínio, são necessárias quatro toneladas de Bauxito, o que produz cerca de duas toneladas de lama vermelha ⁽¹⁾. Adicionalmente, a metalurgia secundária não causa impactos com mineração.

Como a metalurgia secundária do alumínio é mais vantajosa do que a metalurgia primária, o valor da sucata, obedecendo à lei do mercado, de oferta e procura, é alto, o que criou uma categoria de trabalhadores informais, que se dedicam a coleta de latas de alumínio. Esta categoria auxilia o orçamento de famílias de baixa renda e faz do Brasil um dos países que mais recicla alumínio no mundo, conforme figura 1.2 ⁽¹⁾

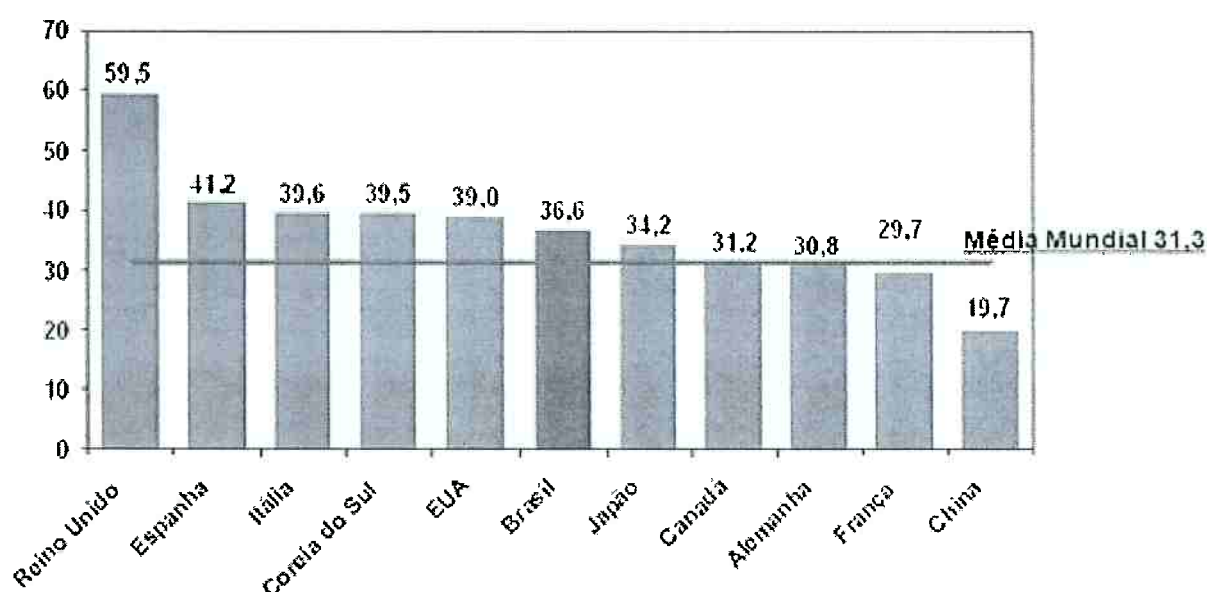


Figura 1.2- Porcentagem de reciclagem de alumínio doméstico em 2008 ⁽⁷⁾

1.1.2 – Metalurgia Secundária do Alumínio

A metalurgia secundária do alumínio pode ser dividida em dois grupos principais: refusão de sucatas e tratamento de drosses.

A refusão é normalmente feita em fornos rotativos ou a cadinho, se a escala de produção for maior ou menor, respectivamente ⁽¹⁾. Nesta operação são utilizados fluxos salinos, para proteção do banho metálico, além de eliminadores de inclusões, com um funcionamento físico-químico muito similar à escória. O volume do fluxo salino não passa os 2% da carga ⁽¹⁾. Quando a sucata possui baixa espessura, como cavacos, ou folha e lata de alumínio, aumenta a quantidade de impurezas, verificadas na tabela 1.8, necessitando de uma maior carga de fluxo. A temperatura de trabalho, em ambos os casos ficam em torno de 700 a 800°C

Tabela 1.8 - Fontes de sucatas e suas impurezas ⁽¹⁾

Tipo de sucata	Impurezas físicas
Cabos	Fe, Zn, Cu e orgânicos
Estamparia	Vernizes, tintas e orgânicos
Perfis	Fe, Cu e plásticos
Chapas	Fe, óxidos e terra
Papel alumínio	Óleo, restos de alimentos e papel
Cavacos	Óleos, Fe, Zn, Cu e Si
Persianas	Tintas
Bisnagas	Fe, tintas, plásticos
Radiadores	Fe, Sn, Pb e plásticos
Blocos de motores	Fe, Zn e Sb
Pistões	Fe, Cr, óleo, orgânicos
Latas de bebidas	Fe, Cu, Mg, tintas e vernizes

As drosses são resultantes do processo de fundição do alumínio. Durante o processo de fundição, devido à alta reatividade do alumínio com o oxigênio, ocorre a formação de uma camada de óxido, menos densa do que o banho metálico, que separa o alumínio fundido da

atmosfera oxidante, servindo assim como barreira para o processo de oxidação. A remoção desta camada, antes da etapa de lingotamento, faz com que uma parte do alumínio seja removido, juntamente com o óxido, formando uma mistura heterogênea, chamada de drosse, constituída de alumínio, óxidos e demais impurezas do banho metálico⁽¹⁾.

Normalmente, são produzidos de 15 a 25kg de drosse por tonelada de alumínio fundido⁽¹⁾. Esta, pode ser classificado em três tipos:

- Drosse branca: Provém da metalurgia primária do alumínio, plantas de extrusão, plantas de laminação e fundições. Diferencia-se das demais pela ausência dos fluxos salinos utilizados na refusão da sucata, além de ter uma coloração clara, variando do branco para o cinza. Contém de 15% a 70% de alumínio na forma metálica;
- Drosse negra: Provém da metalurgia secundária, onde há o uso de fluxos salinos para remoção de impurezas. Tem uma coloração escura;
- Saltcake: Resultado da recuperação do alumínio contido nas drosses branca e negra. Contém elevada concentração de sais e tem uma cor escura. Contém entre 1 e 7% de alumínio.

1.2 – Flotação

Assim como outras operações unitárias que se utilizam de propriedades físicas para realizar a individualização de assembléias ou espécies minerais, a flotação baseia-se nas diferenças das propriedades físico-químicas entre as superfícies dos materiais. Estas por sua vez são dependentes da natureza e da força de ligação entre os seus átomos, íons, ou moléculas.

A diferenciação entre as espécies minerais é dada pela capacidade de suas partículas de prenderem a bolhas de gás (geralmente ar), uma vez que em função do numero de bolhas captado, a densidade do conjunto partícula-bolhas torna-se menor que a do meio, deslocando-se então para a superfície⁽⁹⁾. Esta propriedade é chamada de hidrofobicidade. Para poder medir a hidrofobicidade, deve-se saber a molhabilidade dos minérios em questão. A

molhabilidade é medida pelo ângulo que uma gota de água forma quando em contato com o minério. O ângulo de contato está indicado na figura 1.3⁽¹⁰⁾.

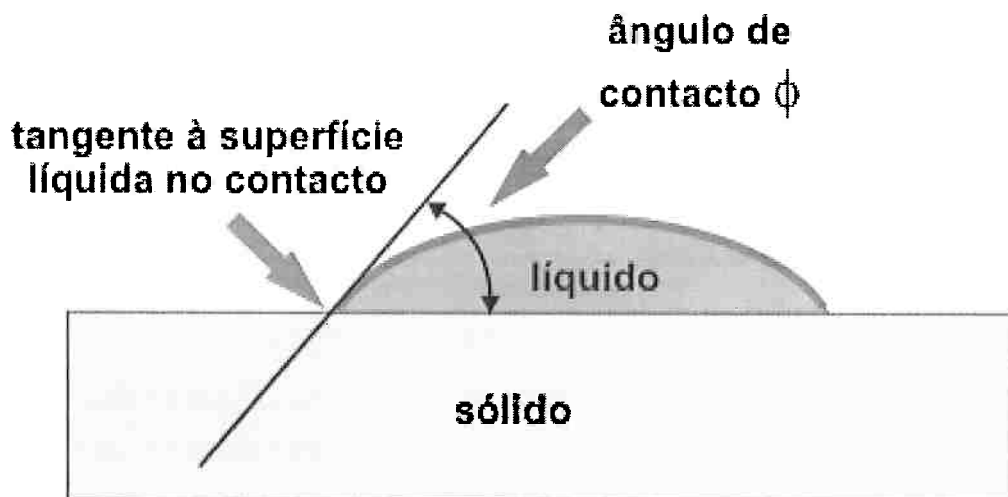


Figura 1.3 – Indicação do ângulo de contato de uma gota de líquido com o sólido⁽¹⁰⁾

Quanto maior o ângulo ϕ de contato, menor a molhabilidade do minério e maior a hidrofobicidade. Nota-se que a molhabilidade ideal acontece quando $\phi = 0^\circ$. Infelizmente, a maioria dos minerais é hidrofílica, necessitando de um tratamento superficial antes de iniciar a flotação⁽⁹⁾.

Este tratamento consiste em misturar o minério a um surfactante, que vai se aderir a apenas um dos minérios, tornando-o hidrofóbico, fazendo com que apenas ele flote. Esta reação seletiva acontece devido às propriedades únicas do minério em questão, geralmente elétricas ou eletrostáticas. Porém, podem ser forças moleculares. O coletor fica aderido quimicamente a um ponto da superfície⁽⁹⁾.

Como toda reação, os coletores podem ser reativos demais e podem se tornar não seletivos. Para evitar este fato, deve-se modular corretamente a coleta com outras substâncias, a fim de evitar que o coletor fique aderido a qualquer superfície. São duas as substâncias: o depressor e o ativador. O depressor tem a função de diminuir a atividade do coletor nas partículas indesejadas. Enquanto que o ativador tem a função de aumentar a reatividade superficial do material desejado em relação ao coletor, caso seja muito fraco⁽⁹⁾.

1.2.1 – Coletores, ativadores, depressores e espumantes

Os coletores são compostos de uma estrutura molecular dividida em duas partes: uma possui natureza apolar (covalente) e outra tem natureza polar (iônica). A parte molecular geralmente é uma cadeia carbônica, podendo ser ramificada ou cíclica, enquanto que a iônica pode assumir diversas formas diferentes. Em solução, a parte iônica se dissocia, enquanto que a parte apolar tende a se aderir às bolhas de ar. A figura 1.4 ilustra uma molécula de coletor.

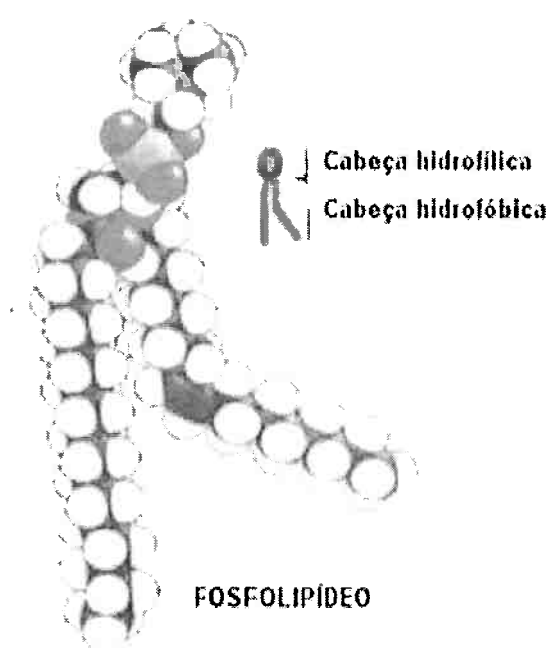


Figura 1.4 - Ilustração de uma molécula de coletor⁽¹¹⁾

Os coletores são classificados de acordo com sua parte iônica, podendo ser⁽⁹⁾:

- Catiônicos, sendo estes, somente as aminas e seus acetatos
- Aniônicos

A tabela 1.9 mostra o ângulo de contato de acordo com o tamanho da cadeia apolar presente na molécula⁽⁹⁾. Além disso, cadeias isoméricas são mais molháveis do que as normais. Uma cadeia isomérica é uma cadeia onde o grupo polar está ligado a um carbono secundário ou terciário, e não primário.

Tabela 1.9- Radicais com número de carbono correspondente e ângulo de contato ⁽¹²⁾

Radical	Nº de carbonos	Ângulo de contato
metil	1	50°
etil	2	60°
propil	3	68°
butil	4	74°
iso-butil	4	78°
Amil	5	80°
iso-amil	5	86°
hexil	6	87°
heptil	7	90°
octil	8	94°
cetil	16	96°

Os coletores catiônicos são adsorvidos e desorvidos de maneira mais fácil e rápida do que os aniônicos, portanto, sendo menos seletivos. É mais usado na flotação de não-metálicos, como alumino-silicato, por exemplo. Sua variável operacional mais importante é o pH ⁽¹³⁾.

Os espumantes têm a única função de criar a espuma para que o mineral hidrofóbico se adsorva para a superfície da bolha. Alguns coletores já conseguem produzir a espuma, porém, em alguns casos são indesejáveis, pois o controle sobre a mesma é perdido.

Estudos realizados mostram que alguns compostos inorgânicos, como sulfetos e fosfatos servem de depressores, auxiliando na remoção da sílica presente na escória ⁽¹⁴⁾.

1.2.2 – Química de interface

O mecanismo por trás da flotação é a química de interfaces líquido/gás, sólido/líquido e sólido/gás. Os tipos de ligações entre átomos são:

- Covalente – elétrons são compartilhados entre núcleos, ligação forte e orientada, causando uma superposição de orbitais;
- Iônica – um átomo doa enquanto outro recebe um ou mais elétrons, ligação forte e sem direção;
- Metálica – entre átomos doadores de elétrons, forte e sem direção.

Existe um quarto tipo de ligação, este entre moléculas, chamada de Van der Waals. Esta ligação é mais fraca do que as demais, e apenas mantém as moléculas juntas, aglomerando-as, não as unindo de fato. São quatro as forças que contribuem para a ligação de Van der Waals⁽⁹⁾:

- A primeira força envolve a orientação de moléculas, que formam um dipolo elétrico permanente. A grande eletronegatividade dos átomos de flúor, oxigênio e nitrogênio, comparado com o hidrogênio, fazem com que este tipo de ligação seja a mais estável, formando uma ligação de hidrogênio entre os átomos. Estas ligações de hidrogênio estão representadas na figura 1.5⁽⁹⁾;

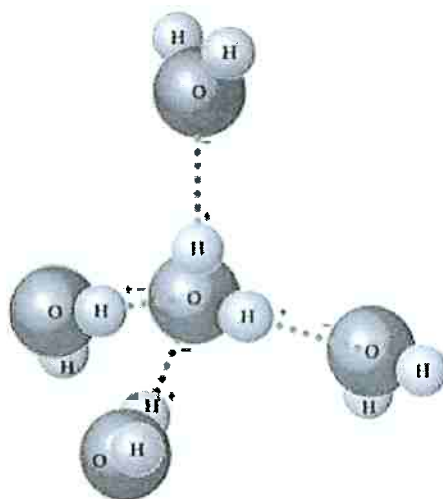


Figura 1.5 - Representação das ligações de hidrogênio⁽¹⁵⁾

- A segunda força envolve um dipolo permanente e um dipolo induzido, formando uma ligação mais fraca que o exemplo anterior. A indução do dipolo está esquematizada na figura 1.6;

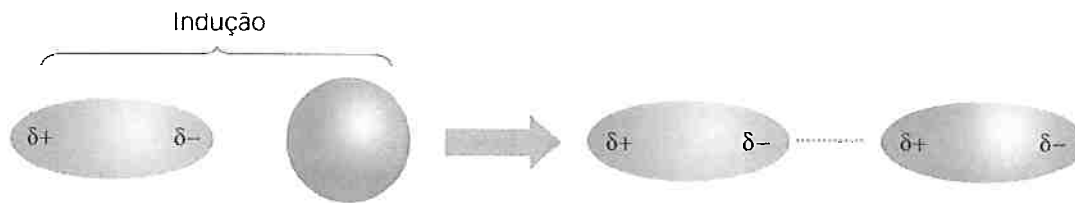


Figura 1.6 - Indução do dipolo elétrico⁽¹⁶⁾

- O terceiro tipo envolve dois dipolos permanentes;
- O quarto tipo envolve dois dipolos induzidos, sendo este, a interação mais fraca entre duas moléculas.

Para encontrar uma relação entre hidrofobicidade e o tipo de ligação, estudos foram feitos para classificar os sólidos cristalinos de acordo com a sua ligação⁽¹⁷⁾. Chegou-se à conclusão que a hidrofobicidade está relacionada com a polaridade e capacidade de ionização do sólido, e não de sua estrutura cristalina.

1.2.2.1 - Termodinâmica de interface

Os potenciais termodinâmicos desenvolvidos para o interior de uma única fase são deduzidos a partir da energia interna U ⁽⁹⁾:

$$U = F + TS \quad (1.1)$$

Onde:

- F é a energia livre de Helmholtz;

- T é a temperatura;
- S é a entropia;

Considerando-se temperatura e pressão constantes ⁽⁹⁾:

$$dU = TdS - pdV \quad (1.2)$$

Onde:

- p é a pressão;
- V é o volume

E da energia livre de Gibbs, G ⁽⁹⁾:

$$G = F + PV = U - TS = PV \quad (1.3)$$

$$dG = -SdT + VdP \quad (1.4)$$

Sendo que T e P são grandezas intensivas, enquanto que S, V e U são grandezas extensivas.

Porém, há duas situações diferentes. Quando uma molécula está imersa num líquido, está rodeada de outras moléculas, sendo afetada por forças atrativas. Para uma dessas moléculas ir para a bolha de ar, precisa romper estas forças atrativas. Quando parte destas ligações é rompida e a molécula está na superfície, existe uma força tangencial à esta superfície. Esta força se chama tensão superficial. Para um aumento infinitesimal da área interfacial, dA^s , o trabalho associado é ⁽⁹⁾:

$$dW_{rev}^s = \gamma dA^s \quad (1.5)$$

Onde o sobrescrito denota a interface.

Para sistemas envolvendo interfaces, este parâmetro deve ser adicionado, além do potencial químico ($\sum \mu_i dn_i$) à energia interna ⁽⁹⁾.

$$dU = TdS - pdV + \gamma dA^s + \sum \mu_i dn_i \quad (1.6)$$

Podemos combinar a equação 1.6 com as outras mencionadas anteriormente (1.1 a 1.5) e obter:

$$\gamma = \left(\frac{\partial U}{\partial A^s} \right)_{S,V,n_j} = \left(\frac{\partial F}{\partial A^s} \right)_{S,P,n_j} = \left(\frac{\partial F}{\partial A^s} \right)_{T,V,n_j} = \left(\frac{\partial G}{\partial A^s} \right)_{T,PV,n_j} \quad (1.7)$$

Podemos fazer a seguinte consideração ⁽⁹⁾:

$$V = V^l + V^g \quad (1.8)$$

Onde:

- V^l é o volume da fase líquida
- V^g é o volume da fase gasosa

E considerar que o volume da interface $V^s = 0$

Como T , P e μ_i são intensivas, são uniformes nas fases e na interface. Usando estes conceitos, a variação da energia interna U do sistema pode ser subdividida numa variação da energia interna da fase α , β e da interface ⁽⁹⁾.

$$dU^\alpha = TdS^\alpha - PdV^\alpha + \gamma dA^s + \sum \mu_i dn_i^\alpha \quad (1.9)$$

$$dU^\beta = TdS^\beta - PdV^\beta + \gamma dA^s + \sum \mu_i dn_i^\beta \quad (1.10)$$

Porém, subtraindo as energias internas referentes à fase líquida e a gasosa, sobra um residual referente à interface ⁽⁹⁾:

$$dU^s = TdS^s - PdV^s + \gamma dA^s + \sum \mu_i dn_i^s \quad (1.11)$$

Considerando as variáveis intensivas constantes e integrando a equação anterior, obtém-se ⁽⁹⁾:

$$U^s = TS^s + \gamma A + \sum \mu_i dn_i^s \quad (1.12)$$

E como se tem que ⁽⁹⁾:

$$H = U + PV \quad (1.13)$$

$$F = U - TS \quad (1.14)$$

Pode-se simplificar para ⁽⁹⁾:

$$\gamma = \frac{F^s - \sum_i \mu_i n_i^s}{A} = f^s - \sum_i \mu_i \Gamma_i \quad (1.15)$$

Onde $\Gamma_i = n_i^s / A^s$

Γ_i é a densidade de adsorção da espécie i.

Podemos isolar Γ_i e, com temperatura constante, chegar em ⁽⁹⁾:

$$\Gamma_i = - \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \mu_i} \right)_{T, \mu_j} \quad (1.16)$$

Porém, deve-se considerar mais um fator, a atividade das espécies em solução ⁽⁹⁾:

$$\mu_i = \mu_i^\circ + RT \ln(a_i) \quad (1.17)$$

$$\Gamma_i = - \frac{1}{RT} \left(\frac{\partial \gamma}{\partial a_i} \right)_{T, \mu_j} \quad (1.18)$$

1.2.2.2 – Flotação e hidrofobicidade

Na flotação, teremos uma fase gasosa, representada pelas bolhas de ar, a fase líquida e a fase sólida. Podemos representar isso através da figura 1.7 ⁽⁹⁾:

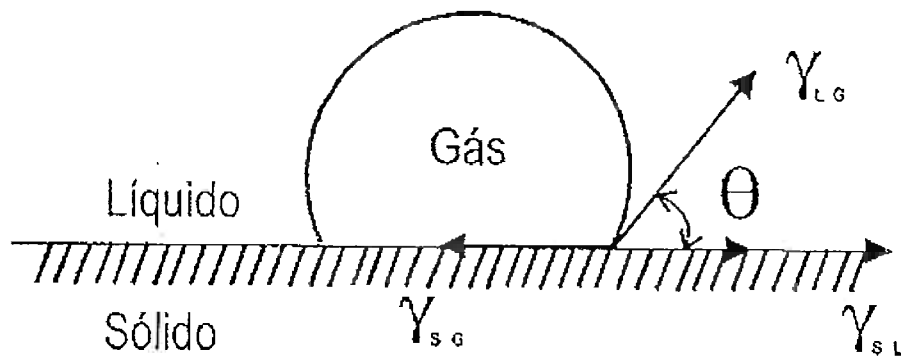


Figura 1.7 – Esquema do ângulo de contato com as tensões entre sólido, líquido e gás ⁽⁹⁾

O equilíbrio entre as três fases pode ser representado pela equação 1.19:

$$\gamma_{SG} - \gamma_{SL} = \gamma_{LG} \cos \theta \quad (1.19)$$

A variação de energia livre de adesão entre as partículas e a bolha de ar é:

$$\Delta G = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG}) \quad (1.20)$$

Juntando as duas equações, temos a relação entre variação de energia livre de Gibbs com o ângulo θ , ou seja, hidrofobicidade:

$$\Delta G = \gamma_{LG} (\cos\theta - 1) \quad (1.21)$$

ΔG será negativo com θ variando de 0° a 180° . Podemos notar que quando $\theta = 0^\circ$, ΔG será máximo, enquanto que com $\theta = 180^\circ$, ΔG será 0, tornando a flotação termodinamicamente impossível.

Note que mesmo quando a termodinâmica prova ser possível, a flotação pode não ocorrer devido a problemas ligados com a cinética ou hidrodinâmica.

Na literatura, há poucas informações para o cálculo de θ .

1.2.2.3 – Granulometria e a flotação

Alguns autores reuniram os fatores de flotação numa expressão⁽¹⁸⁾:

$$P_f = P_c \times P_a \times P_s \quad (1.22)$$

Onde: P_a é a probabilidade de adesão, P_s é a probabilidade de formação de um estado agregado estável e P_c é a probabilidade de colisão entre as partículas. P_c está relacionado com variáveis físicas, como viscosidade da polpa, densidade, velocidade relativa entre bolha e partícula e com seus respectivos diâmetros.

Foi deduzida uma equação, para uma dada vazão de gás, relacionando os diâmetros em questão com a eficiência do processo⁽¹⁸⁾:

$$E_c \sim \left(\frac{d_p}{d_b} \right)^2 \quad (1.23)$$

Onde: d_p é diâmetro da partícula e d_b é o diâmetro da bolha.

Pela equação, podemos notar que a E_c será baixa para um diâmetro pequeno de partícula. Apesar de um material mais fino possuir uma maior área superficial do que um material mais grosso requer uma menor quantidade de coletor. Porém, é mais difícil de flotar o material fino por razões hidrodinâmicas e cargas elétricas das partículas. Há duas alternativas usadas para melhorar a flotação destes finos: flotação transportadora e por cisalhamento. O processo de floculação por cisalhamento objetiva a formação de agregados seletivos de partículas hidrofobizadas em um sistema turbulento e posterior flotação desses agregados. Como resultado da agitação turbulenta e das colisões, ocorre a formação desses agregados através do efeito hidrofóbico.

1.2.3 – Xantatos

Xantatos são sais e ésteres de ácido xântico. A figura 1.7 ilustra uma molécula genérica de xantato.

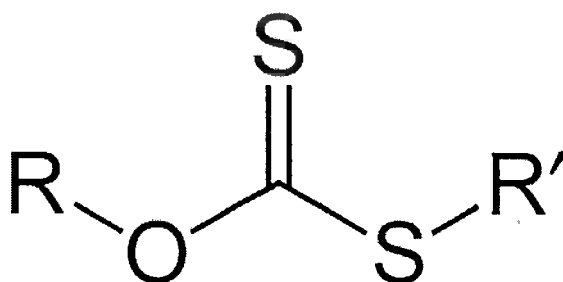


Figura 1.8 - Cadeia carbônica representativa de um xantato ⁽¹⁹⁾

Numa flotação, seu mecanismo de atuação é uma combinação de forças eletrostáticas e químicas ⁽¹⁹⁾. Além disso, xantatos são considerados coletores aniônicos. Testes foram feitos para diferentes tamanhos de cadeia carbônica para a flotação de níquel, cobre, zinco e ferro, com pH variando de 4 a 8 ⁽¹⁹⁾. Os resultados obtidos foram os seguintes, conforme figura 1.9.

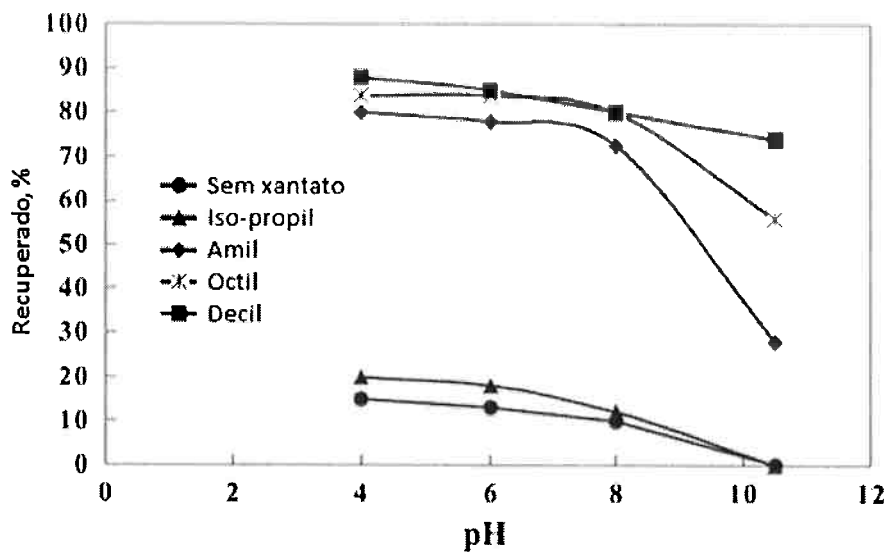


Figura 1.9 - Recuperação de alumínio em função do pH e do xantato usado⁽¹⁷⁾

Partindo do pressuposto que a cinética de flotação é de primeira ordem, chega-se à⁽¹⁹⁾:

$$R = 1 - \exp(-kt) \quad (1.24)$$

Onde R é a recuperação, k é a constante de flotação.

A figura 1.10 mostra a cinética de recuperação em função do óxido.

Neste estudo realizado, chegou-se à que ocorre uma flotação seletiva, beneficiando o cobre e descartando a sílica⁽¹⁹⁾. A um pH elevado, 10,5 no caso, os óxidos ficam carregados negativamente, o que promove a dispersão entre eles, facilitando a separação.

O trabalho realizado por Rao⁽¹⁹⁾, do estudo que foi realizado difere em um aspecto: ele usou óxidos. Óxidos são hidrofílicos, devido à tendência de formação de ligações de hidrogênio do oxigênio com as moléculas de água. Portanto, ele usou um coletor mais hidrofílico, ou seja, com cadeias mais longas. Esse fato sugere a ação de forças eletrostáticas para a flotação dos óxidos.

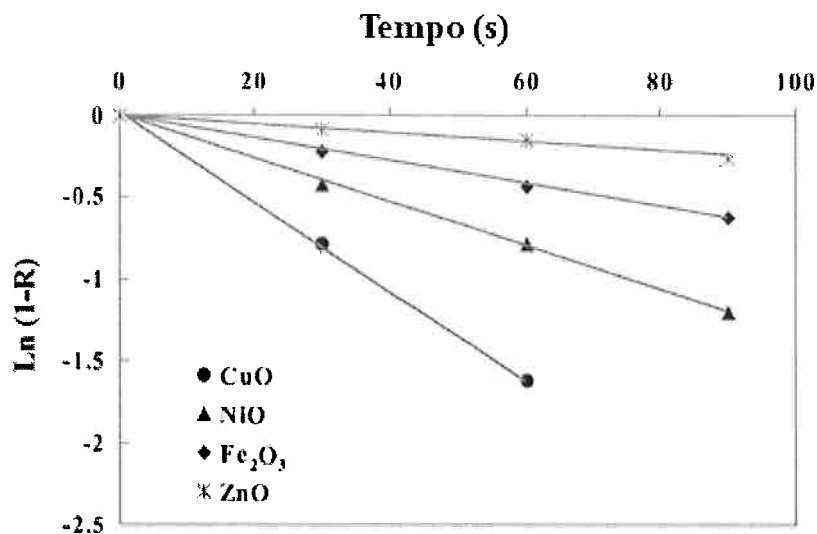


Figura 1.10 - Cinética de recuperação em função do óxido, para o octil-xantato e pH 8,5⁽¹⁹⁾

1.2.4 – Flotação do alumínio

Na literatura, há pouca informação sobre a flotação do alumínio. Soto e Toguri⁽²⁰⁾, fizeram testes de flotação com alumínio usando o cobre como ativador e xantatos como coletores, além de uma preparação superficial com o uso de ácido sulfúrico.

Pelo estudo realizado, o alumínio metálico não é flotado facilmente. Com a adição de cobre, tem-se a seguinte reação:



No estudo realizado, testou-se a flotabilidade de alumínio em pó puro, com granulometria variando de 40 a 100 Mesh, enquanto que a granulometria das drosses branca e negra variavam de 10 Mesh a 200 Mesh⁽²⁰⁾.

O primeiro teste realizado pela dupla foi flotar alumínio em pó sem nenhum tipo de tratamento. Os resultados obtidos ficaram em torno de 15%, mesmo aumentando a quantidade de coletor para 1000mg/L⁽²⁰⁾.

O segundo teste foi feito com uma limpeza superficial do alumínio com ácido sulfúrico, uma vez que a alta reatividade do alumínio faz com que o pó fique recoberto por uma camada de óxido. Este procedimento não melhorou a recuperação do alumínio⁽²⁰⁾.

O terceiro foi usar cobre para ativar o alumínio. O cobre foi utilizado neste caso por ser altamente flotável. Com uma cementação suficiente do cobre sobre o alumínio, a recuperação chegou a 100%, porém, o cobre precisa agir sobre o alumínio, e não sobre seu óxido, necessitando de uma preparação superficial anterior. O tratamento foi feito com 10^{-2}M H_2SO_4 a 55°C por 15 minutos⁽²⁰⁾.

Podemos representar o recobrimento pelas equações a seguir:



A constante de equilíbrio é dada por:

$$\log k_{eq} = \frac{n (E^\circ_1 - E^\circ_2)}{2,3 RT} \quad (1.28)$$

A 25°C ,

$$\log K_{eq} = 208 = \log \frac{[\text{Al}^{+3}]^2}{[\text{Cu}^{+2}]^3} \quad (1.29)$$

De acordo com a reação acima, ela deveria ocorrer até que a concentração de íons de cobre se aproximasse de zero. Porém, ela é dificultada devido à formação de uma camada passiva de $\text{Al}(\text{OH})_3$. Essa camada é estável em pH variando de 4 a 9 e temperatura ambiente. O tratamento com ácido sulfúrico e a posterior adição de íons de cobre tiveram um bom resultado, uma vez que tornou o alumínio mais reativo. A dissolução da camada passiva gera gás hidrogênio⁽²⁰⁾:



O potencial para a evolução do hidrogênio no alumínio é de 0,5 V a 0,8 V, mas é menor do que o potencial de oxidação do alumínio.

A cementação do cobre na drosse branca é bem rápida (nota-se pela evolução do gás), porém, fica porosa e mal aderida. A solução foi agitar a drosse em água por 5 minutos,

contendo 50% de sólido, e adicionar nitrato de sódio, para evitar a formação de gás, que causava um recobrimento poroso de cobre, além de diminuir a recuperação do alumínio. Nitrato de sódio evita a formação do hidrogênio, pois é reduzido num potencial inferior, mas também evita a cementação do cobre⁽¹⁹⁾.

1.3 - WDS (Espectroscopia por dispersão de onda)

A espectroscopia por dispersão de onda consiste em emitir um feixe de raio-X na amostra a uma mudança contínua de ângulos. Através da lei de Bragg, é possível determinar parâmetros da rede atômica, podendo determinar assim os átomos que compõe o material⁽²¹⁾.

O feixe tipicamente é carregado com um potencial de 15 a 20 kV, antes de ser emitido em direção à amostra. O fenômeno é considerado superficial, por causa da reflexão do feixe, porém, pode ocorrer uma penetração de algumas camadas atômicas. O feixe refletido é medido por um detector, que através do cálculo da equação 1.31, determina o átomo em questão⁽²¹⁾.

$$n\lambda = 2d\sin(\theta) \quad (1.31)$$

Onde:

- n é um número inteiro;
- λ é o comprimento de onda do raio-X;
- d é a distância entre átomos, parâmetro único para cada átomo;
- θ é o ângulo de incidência do feixe.

As vantagens do uso do WDS são⁽²¹⁾:

- Método não destrutivo de análise;
- Altamente preciso, medindo superfícies cuja ordem de grandeza é a de micrômetros;
- Funciona bem em qualquer tipo de material;
- Resolução de pico superior ao método EDS (dispersão de energia).

As desvantagens do método são ⁽²¹⁾:

- Mede átomos de número atômico maior que 5;
- Costumeiramente, há sobreposição de picos;
- Não mede valência de átomos;
- As várias massas de isótopos não podem ser medidas através deste método.

2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estudar a recuperação de alumínio a partir da drosse branca, analisando os seguintes aspectos:

- Reatividade do alumínio em uma solução de sulfato de cobre, bem como parâmetros para aperfeiçoar o processo;
- Flotabilidade da drosse branca, utilizando o xantato e $\text{pH}=7$;
- Seletividade e rendimento da flotação.

3. Materiais e Métodos

Este trabalho estuda, em escala de laboratório, aspectos relativos à tecnologia de flotação da drosse branca. A drosse em questão tem em torno de 3% de alumínio na forma metálica e mais de 50% de alumínio em ligas, com sódio e magnésio, principalmente⁽²²⁾.

A drosse fora recebida já moída. A moagem se deu num moinho de martelos, ilustrado na figura 3.1.

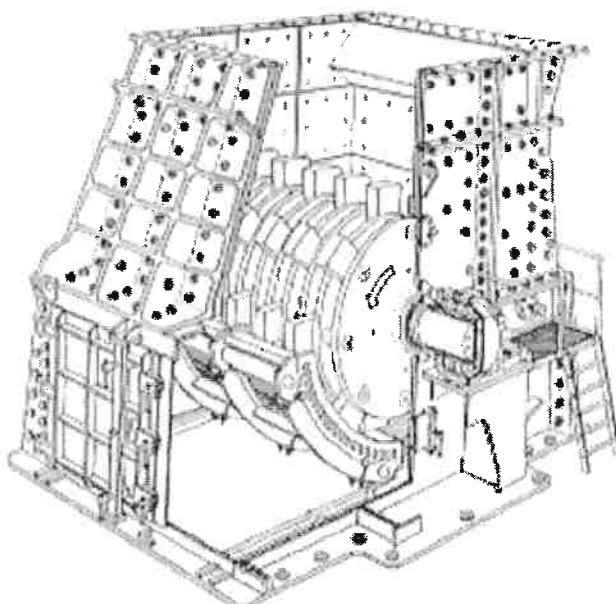


Figura 3.1- Ilustração de um moinho de martelos⁽²³⁾

3.1 Peneiramento

Como a flotação requer uma granulometria específica, de 40 a 100 Mesh, indicado por Toguri⁽²⁰⁾, fez-se necessária uma etapa de peneiramento. Escolheram-se as peneiras cujas malhas Mesh eram: 24, 48, 80 e 120. As malhas intermediárias foram escolhidas arbitrariamente, apenas para proteção mecânica das demais peneiras. Adicionalmente, fez-se uso também, de uma mesa vibratória e uma tampa, para que durante o processo, não houvesse perdas de material. Toda a drosse fora separada em amostras de aproximadamente 2 kg, onde

a limitação era o volume disponível nas peneiras. Cada amostra ficou aproximadamente 10 minutos na mesa vibratória, até que tivesse sido totalmente peneirada. Ao término de cada amostra, o retido de cada peneira era separado em um saco apropriado e demarcado com a faixa granulométrica respectiva.

3.2 Limpeza superficial da drosse

Antes da amostra passar pela etapa de deposição eletrolítica, ela passou por um atritador. A parte referente à faixa granulométrica de interesse foi separada em quatro partes iguais, onde a limitação foi o tamanho do recipiente do atritador.

Testes preliminares com amostras de tamanho menor foram feitas, usando-se tempos de 7 e 15 min de residência no atritador, ambas com 800 rpm, a fim de verificar, qual é a melhor opção para efetuar a limpeza superficial.

3.3 Deposição eletrolítica

A etapa de deposição consiste em fazer o recobrimento do alumínio presente na drosse com cobre. Usou-se dois béqueres de 1L cada, funil analítico, baqueta para agitação manual, solução de sulfeto de cobre e filtro de malha média. Como toda a amostra dentro da faixa granulométrica de interesse deve ser recoberta, fez-se testes com 10g variando-se os seguintes parâmetros, além do tempo de residência no atritador:

- Temperatura da solução, sendo estas 25 e 70°C;
- pH da solução, sendo estes 2 e 4;
- Tempo de residência, sendo estes 5, 10 e 15min.

A solução de sulfeto de cobre fora preparada com cristais de sulfeto de cobre, adicionado à água destilada, suficiente para que o pH desejado seja atendido. Fez-se um teste para cada uma das combinações acima, afim de determinar qual é a melhor forma de fazer a deposição, visando a flotação em si.

Com os parâmetros já selecionados, seguiu-se para o recobrimento de toda a drosse, indo por etapas, com aproximadamente 250g de amostra, sendo esta a limitação de volume do equipamento.

3.4 Flotação utilizando amil-xantato

A etapa seguinte consiste em fazer a flotação da drosse preparada. A célula de flotação usada possui recipiente de 1L. Para realizar a flotação, são necessários 15% de sólido em volume, presente no recipiente. Calculou-se por volta de 220g de amostra para cada corrida. O parâmetro variado foi a quantidade de reagente adicionado, para um tempo fixo de 5min. A rotação utilizada foi fixada em 800rpm. Cada amostra recebeu um nome, denotando-se como prefixo a letra X, por causa do reagente utilizado, xantato no caso, e como sufixo, a quantidade em mg utilizada.

O amil-xantato fora recebido em *pellets*, sendo necessário sua dissolução para ser usado na flotação. Fora previsto usar as quantidades de 20, 50, 80, 110 e 140 mg de amil-xantato. A tabela 3.1 indica a quantidade de xantato a ser adicionado e a designação de cada amostra. Além disso, óleo de pinho fora usado como espumante, na quantidade de 0,1mL por etapa.

Tabela 3.1- Designação das amostras, junto com a quantidade de reagente adicionado

Nome da amostra	Quantidade de xantato (mg)
X-20	20
X-50	50
X-80	80
X-110	110
X-140	140

Adicionalmente, como o xantato fora recebido em *pellets*, 5g foram dissolvidos em 100mL de água, formando uma solução. A tabela 3.2 indica a quantidade de solução a ser adicionada a cada amostra, para a etapa de flotação.

Tabela 3.2 - Quantidade de solução adicionada para cada etapa

Quantidade de xantato (mg)	Quantidade de solução (mL)
20	0,4
50	1
80	1,6
110	2,2
140	2,8

Separou-se cinco amostras da drosse, cada uma contendo aproximadamente 220g, ou 15% em volume do recipiente de 1L utilizado nesta etapa. A tabela 3.3 indica a massa de cada amostra, juntamente com sua denominação, e a quantidade de xantato correspondente.

Tabela 3.3 - Medidas antes da flotação

Código da amostra	Xantato adicionado (mg)	Massa antes (g)
X-20	20	220
X-50	50	230
X-80	80	210
X-110	110	235
X-140	140	220

3.5 Medição do teor de alumínio e sua recuperação

Para realizar a quantidade de alumínio e cobre, utilizou-se a técnica WDS.

Para recuperar apenas o alumínio, separando a camada superficial de cobre, utilizou-se ácido sulfúrico, com $\text{pH}=2$.

4. Resultados

O foco deste trabalho é a flotação da drosse branca de alumínio. De acordo com o item 1.2.5, a flotação terá um melhor resultado quando a deposição cobrir a maior parte da superfície do alumínio da drosse.

4.1 Peneiramento

O item 3.1 não apresentou qualquer resultado, uma vez que toda a drosse passou pela etapa e apenas a granulometria de interesse, de 48 a 120 Mesh, foi selecionada. Contudo, da amostra inicial, de aproximadamente 10 kg, apenas 2,1 kg puderam ser aproveitados. A tabela 4.1 indica a granulometria do material

Tabela 4.1 - Granulometria da matéria prima

Granulometria (Mesh)	Massa (g)	%
+24	2300	23,47%
-24 +48	3500	35,71%
-48 +80	1250	12,76%
-80 +120	850	8,67%
-120	1900	19,39%

4.2 Limpeza superficial e deposição eletrolítica

Após os testes preliminares, com os 10g para cada combinação de parâmetros, cada amostra foi vistoriada em uma lupa ótica de aumento de 50x, onde se pode verificar a qualidade de deposição de cobre, assim como a quantidade de cobre. A tabela 4.2 resume todos os resultados, para cada condição:

- Tempo no atritador;
- Tempo de deposição;
- pH;
- Temperatura.

Considerou-se que uma qualidade boa deposição consiste tanto em uma quantidade alta de cobre presente, assim como este estando sem porosidade; uma qualidade média consiste tanto em pouco cobre presente, como este cobre estando poroso; e uma qualidade ruim significa ausência de cobre.

Tabela 4.2 - Tabela de resultado em função dos parâmetros apresentados

Atritador (min)	Tempo de deposição (min)	pH	Temperatura (graus C)	Qualidade/quantidade da deposição
7	5	2	25	Ruim
			45	Ruim
			70	Média
		4	25	Ruim
			45	Ruim
			70	Ruim
	10	2	25	Ruim
			45	Média
			70	Boa
		4	25	Ruim
			45	Ruim
			70	Ruim
15	5	2	25	Média
			45	Boa
			70	Boa
		4	25	Ruim
			45	Ruim
			70	Ruim
	10	2	25	Boa
			45	Boa
			70	Boa
		4	25	Ruim
			45	Ruim
			70	Ruim

Em comparação com o trabalho realizado por Soto e Toguri ⁽²⁰⁾, pode-se notar uma lenta evolução de gás, possivelmente ocasionada pela redução de atividade do alumínio em meio às impurezas presentes na drossa. Por isso, com os resultados da tabela 4.1, pode-se determinar os parâmetros para uma melhor e mais rápida deposição, considerando o aspecto econômico do processo.

4.3 Flotação

Depois de realizada a experiência para as cinco amostras, separou-se o flotado e, após secagem em estufa a 80°C, pesou-se a massa obtida em cada experiência, indicado na tabela 4.3.

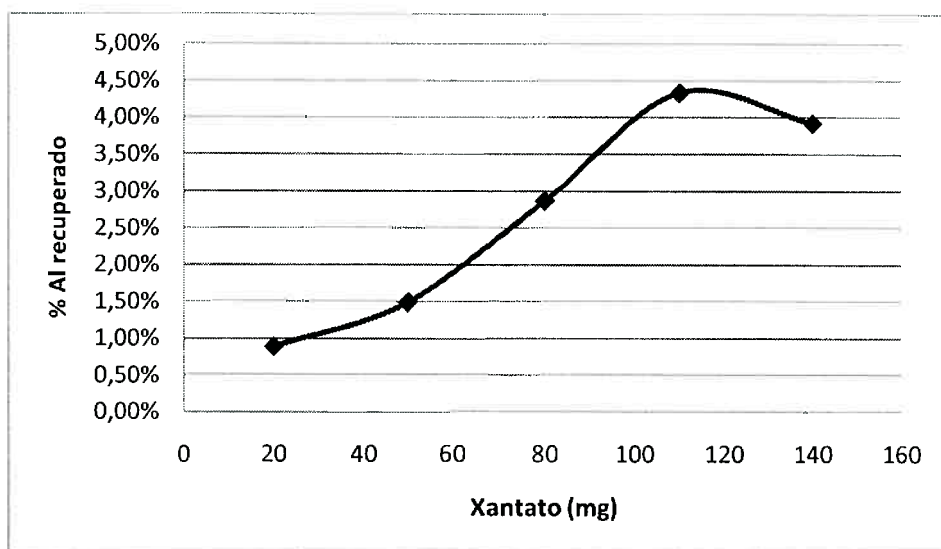
Tabela 4.3 - Massa recuperada da flotação

Código da amostra	Peso depois (g)	% coletada	Análise WDS	Massa de coletada (g)	Al/Cu % sobre massa inicial
X-20	6,3	2,86%	31,23%	1,97	0,89%
X-50	6,3	2,74%	54,54%	3,44	1,49%
X-80	9,6	4,57%	62,73%	6,02	2,87%
X-110	14,2	6,04%	71,64%	10,17	4,33%
X-140	13,8	6,27%	62,35%	8,60	3,91%

Pode-se notar que uma pequena massa fora flotada, possivelmente causada pela redução de atividade da drossa frente a tantas impurezas, tanto durante a flotação, impedindo o reagente de chegar até o cobre, como impedindo a deposição. Em comparação com Soto e Toguri ⁽²⁰⁾, que recuperaram cerca de 90%, a quantidade de alumínio recuperado foi muito inferior ao esperado, possivelmente devido aos problemas apresentados acima, uma vez que Soto e Toguri ⁽²⁰⁾ utilizaram alumínio em pó puro, sem contaminantes.

Além disso, o trabalho realizado fora feito em bateladas. A indústria, foco do trabalho, possui uma rotina diferente, fazendo de forma mais contínua, evitando assim perdas e degradações das matérias primas com o tempo ou no transporte desta entre as etapas.

Com os resultados, pode-se calcular a curva de flotação:



Esta curva nos indica a melhor quantidade de xantato a ser adicionado, para recuperar a maior quantidade de alumínio. Esta quantidade fica em torno de 110mg para 220g de matéria prima.

4.4 Análise WDS

Cada amostra seguiu para análise WDS para analisar o teor de alumínio em cada flotado. A tabela 4.4 mostra o teor de alumínio, juntamente com o teor de cobre e enxofre, de cada um dos flotados.

Tabela 4.4 – Resultado da análise WDS

Nome da amostra	Al	Cu	S	Fe	Si
X-20	27%	4,23%	12,35%	1,64%	0%
X-50	37,73%	16,81%	2,61%	1,95%	6,12%
X-80	42,12%	20,61%	0,66%	1,94%	0%
X-110	30,67	40,97%	1,23%	0,67%	1,42%
X-140	36,23	26,12%	2,96%	0,9%	1,17%

A partir do resultado do WDS, pode-se observar que a reação com o cobre é superficial, formando uma camada fina, permitindo a penetração do feixe de raio-X até o núcleo de alumínio.

Mesmo com uma baixa massa recuperada de alumínio, pode-se notar a alta eficiência do processo, pois, exceto a amostra X-50, os resultados apresentam cerca de 2% de impurezas. Além disso, o resultado de cerca de 4% pode indicar que apenas o alumínio na sua forma metálica fora flotado, pois é um valor similar ao apresentado pelo trabalho anterior⁽²²⁾

5. Conclusão

Alguns pontos, durante a execução deste trabalho, foram levantados:

- A qualidade do recobrimento superficial é a etapa crítica do processo, uma vez que o cobre é um metal cujo minério é facilmente flotável. A quantidade de alumínio que fora recoberto também influi no processo de forma significativa.
- A flotação do cobre é utilizada pela indústria há anos e não é bem vista, do ponto de vista do meio ambiente, uma vez que a maioria dos coletores utiliza enxofre em sua composição química. Novos compostos menos agressivos ao ambiente estão sendo desenvolvidos, além do mais, avanços tecnológicos nesta área influirão na flotação do alumínio.

6. Sugestões para trabalhos futuros

Durante o decorrer do trabalho, alguns outros métodos foram sugeridos pelas pessoas que colaboraram com ele, tais como:

- Remoção das impurezas ferríticas antes da deposição através de separação eletromagnética;
- Após o recobrimento, separação eletromagnética da parte ferrítica, seguida de separação eletrostática do alumínio recoberto com cobre;
- Flotação reversa do alumínio;
- Separação do alumínio combinado com outros elementos, além do oxigênio, para aumentar o rendimento.

Referências

1. **Tenório, J. A. S.** *Aspectos Fundamentais e Tecnológicos do Processo de Reciclagem de Latas de Alumínio*. São Paulo: USP, 1996. pp. 1-18.
2. **Environmental Chemistry**. [Online] [Citado em: 01 de 02 de 2011.] <http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/Fe.html#Physical>
3. **Abal**. [Online] [Citado em: 01 de 02 de 2011.] <http://www.abal.org.br/aluminio/ligas.asp>.
4. **Atlasfdry**. [Online] [Citado em: 01 de 02 de 2011.] <http://www.atlasfdry.com/grayiron-hardness.htm>.
5. **Abal**. Associação Brasileira do Alumínio. [Online] [Citado em: 26 de 12 de 2010.] <http://www.abal.org.br/aplicacoes/introducao.asp>.
6. **Abal**. [Online] [Citado em: 01 de 02 de 2011.] http://www.abal.org.br/industria/estatisticas_producao_transf.asp.
7. **Abal**. Associação Brasileira do Alumínio. [Online] [Citado em: 26 de 12 de 2010.] http://www.abal.org.br/industria/estatisticas_capacidade.asp.
8. **Abal**. Associação Brasileira do Alumínio. [Online] [Citado em: 26 de 12 de 2010.] http://www.abal.org.br/aluminio/producao_alupri.asp.
9. **Gaudin, A. M.** *Flotation*. New York : s.n., 1976. pp. 19-196. Vol. 1.
10. **Alfaconnection**. [Online] [Citado em: 26 de 12 de 2010.] <http://alfaconnection.net/images/FQM010111a.gif>.
11. **UFMT**. [Online] [Citado em: 26 de 12 de 2010.] <http://www.ufmt.br/bionet/conteudos/15.09.04/fosfolip.jpg>.
12. **UFMG**. [Online] [Citado em: 01 de 02 de 2011.] <http://www.ebah.com.br/flotacaoliberacao-pdf-a87776.html>.
13. **Shaohua, L. e Ponisseril, S.** *Tunable Synergism/Antagonism in a Mixed Nonionic/Anionic Surfactant Layer at the Solid/Liquid Interface*. 8, New York: Langmuir, 2008, pp. 3874–3879.

14. *Effect of Phosphate and Fluoride on the Flotation of Aluminum-Silicates With Cationic Collector*. Wang, Y.H., Hu, Y.H. e Chen, X.Q. 3, The Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 46, pp. 221-226.

15. **Infoescola**. [Online] [Citado em: 26 de 12 de 2010.]
<http://www.infoescola.com/Modules/Articles/Images/1-0c83644fc1.jpg>.

16. **Esteves, F.** [Online] [Citado em: 26 de 12 de 2010.]
http://nautilus.fis.uc.pt/cec/hiper/fernanda%20esteves/Trab%20individual%20-%20Fernanda%20Esteves/conceitos/ligacoes%20intermoleculares_ficheiros/b.jpg.

17. **Gaudin, A. M.** *Principles of mineral dressing*. New Delhi: s.n., 1957.

18. **Lima, N. P. e Valadão, G. E.** *Avaliação do efeito da granulometria no processo de flotação*. 4, Ouro Preto: s.n., 2008, Revista Escola de Minas, Vol. 61, pp. 473-477.

19. **Rao, S. R., Finch J. A.** Base metal oxide flotation using long chain xanthates. *International Journal of Mineral Processing*. Março de 2003, Vol. 69, 1, pp. 251-258.

20. **Soto, H. e Toguri, J. M.** *Aluminum Recovery from Dross by Flotation*. 1, Toronto: Conservation & Recycling, 1984, Vol. 9, pp. 45-54.

21. **Carleton**. [Online] [Citado em: 26 de 12 de 2010.]
http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/wds.html.

22. **Gómez, Adriana Gómez.** *Determinação do Teor de Alumínio em Drosses Brancas de Alumínio Utilizando Difração de Raio-X*. São Paulo: USP, 2006. pp. 93-117.

23. **SKF**. [Online] [Citado em: 01 de 02 de 2011.]
<http://www.skf.com/cmimages/237881.jpg>.