



UNIVERSIDADE AGOSTINHO NETO
FACULDADE DE ENGENHARIA



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

**CONTRIBUIÇÕES PARA O CÁLCULO DAS CARACTERÍSTICAS
METALÚRGICAS DO CONCENTRADO POR FLUTUAÇÃO DO MINÉRIO DE
NIÓBIO DE BONGA (HUILA)-ANGOLA**

ADILSON SALOMÃO JOSÉ LEMOS
VANILSON DOMINGOS CABENDA

Trabalho de fim do Curso submetido à Faculdade de Engenharia da Universidade
Agostinho Neto para a obtenção do grau de:
Engenheiro de Minas

Orientador

Professor Mestre Jorge Simões

Co-Orientadora

Professora Doutora Alice de Ceita e Almeida

Luanda

2024



UNIVERSIDADE AGOSTINHO NETO
FACULDADE DE ENGENHARIA



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

**CONTRIBUIÇÕES PARA O CÁLCULO DAS CARACTERÍSTICAS
METALÚRGICAS DO CONCENTRADO POR FLUTUAÇÃO DO MINÉRIO DE
NIÓBIO DE BONGA (HUÍLA)-ANGOLA**

112992 - ADILSON SALOMÃO JOSÉ LEMOS

123063 - VANILSON DOMINGOS CABENDA

Trabalho de fim do Curso submetido à Faculdade de Engenharia da Universidade

Agostinho Neto para a obtenção do grau de:

Engenheiro de Minas

Orientador

Professor Mestre Jorge Simões

Co-Orientadora

Professora Doutora Alice de Ceita e Almeida

Luanda

2024

FICHACATALOGRÁFICA

Cabenda, V.D.e Lemos, A.S.J. (2024).“Contribuições para o cálculo das características metalúrgicas do concentrador por flutuação do minério de nióbio de Bonga (Huíla)”.

Trabalho de fim do curso submetida a Faculdade de Engenharia da Universidade Agostinho Neto para o grau de: Engenheiro de Minas

Palavras-Chave: concentrador por flutuação, características metalúrgicas, minério de nióbio.

Permitida a reprodução total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte e sem carácter comercial – Adilson Salomão José Lemos e Vanilson Domingos Cabenda

EPIGRAFE

“Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência...”

Henry Ford

DEDICATORIA

Este trabalho é dedicado aos nossos Pais e Irmãos que sempre apoiaram, incentivaram e contribuíram de forma decisiva para concretização do presente trabalho de final do curso.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não teria sido possível sem o apoio de algumas pessoas, a quem pretendemos endereçar os nossos sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar, expressamos um profundo agradecimento aos nossos orientadores, Doutora Alice de Ceita e Almeida e o Mestre Jorge Simões, pelo acompanhamento, incentivo, disponibilidade e sentido crítico na orientação.

De seguida, expressamos também um sincero agradecimento a GEOANGOL (Geologia e Sondagem S.A.), e o IGEO (Instituto Geológico de Angola) em especial ao Engenheiro José Mabela (GEOANGOL) e o Dr. Américo da Mata (IGEO) pelo apoio na obtenção de alguns dados e disponibilidade.

Ao Senhor Firmino Chipengue (técnico do Laboratório de Minas da FE-UAN), pela disponibilidade em ajudar-nos e o seu incansável apoio.

Aos amigos que a Universidade Agostinho Neto nos trouxe, em especial os do ano 2016 - 2023, por todos os momentos que passamos e memórias que jamais serão esquecidas.

A todos, muito obrigado.

RESUMO

O trabalho de fim de curso abordou o estudo das características metalúrgicas do concentrado de minério de bonga, localizado na província da Huíla, Angola. A pesquisa focou-se na utilização do processo de flutuação para melhorar a recuperação e a qualidade do concentrado, uma técnica amplamente utilizada na mineração para separar minerais valiosos de impurezas. O objetivo principal foi determinar as características metalúrgicas do concentrado da flutuação, calcular e avaliar as propriedades metalúrgicas essenciais, como a composição mineralógica, teor de metal e a eficiência do processo de separação, a fim de otimizar o rendimento e a viabilidade econômica da operação.

Através de análise de dados, foram identificadas as variáveis que mais impactam o desempenho da flutuação, sugerindo ajustes nos parâmetros operacionais para melhorar a concentração do minério de bonga. O estudo também forneceu recomendações sobre as condições ideais de operação e as possíveis melhorias a serem implementadas no processo, contribuindo assim para o avanço da exploração mineral na região.

Palavras-chave: Nióbio, Flutuação.

ABSTRACT

The final course work addressed the study of the concentrated metallurgical characteristics of bonga ore, located in the province of Huíla, Angola. The research focused on utilizing the flotation process to improve concentrate recovery and quality, a technique widely used in mining to separate valuable minerals from impurities. The main objective was to determine the concentrated metallurgical characteristics of the flotation, calculate and evaluate the essential metallurgical properties such as the mineralogical composition, metal content and efficiency of the separation process, in order to improve the yield and the economic goals of the operation.

Through data analysis, the variables that most impact flotation performance were identified, indicating adjustments to operational settings to improve the concentration of boa ore concentration. The study also brought recommendations on ideal operating conditions and possible improvements to be innovative in the process, thus contributing to the advancement of mineral exploration in the region.

Keywords: Niobium, Flotation.

NOMENCLATURA

$\%PR_1$	Percentagem em peso do retido 1 acumulado	%
$\%PR_{i+1}$	Percentagem em peso do retido subsequente acumulado	%
$\%MR_i$	Percentagem da massa retida em cada intervalo	%
d_i	Densidade relativa	g/cm^3
UM	Unidade Metálica	%
M_i	Massa retida de cada intervalo	g
MT	Massa retida total	g
XRF	Florescência de Raio X	
x_i	Percentagem em peso do mineral	%
δ_s	Densidade do sólido	g/cm^3
LOI	Ensaio de perda de fogo	
R_P	Rendimento em peso	%
$\%Retido_{FI}$	Percentagem de retido das faixas de interesse	%
$\%A$	Percentagem de retido total	%
UM_{FI}	Unidade Metalúrgica das faixas de interesse	%
t_{opt}	Tempo ótimo	min
τ	Tempo de residência em cada célula	min
R_{ganga}^i	Recuperação/ganga	%
$R_{e.u}^i$	Recuperação espécie útil	%

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Propriedades físicas do Nióbio.....	19
Tabela 2.2: Propriedades químicas do Nióbio.....	19
Tabela 2.3: Características da Piroclorita e Columbita – Tantalita.....	20
Tabela 3.1: Características mineralógicas do Nióbio de Bonga.....	45
Tabela 3.2: Características químicas do Nióbio de Bonga.....	46
Tabela 3.3: Características granulométrico-químicas.....	47
Tabela 3.4: Representação dos pesos após a secagem.....	53
Tabela 3.5: Massa por cada intervalo granulométrico.....	53
Tabela 3.6: Teor dos elementos de interesse.....	55
Tabela 3.7: % de Nióbio para a identificação das faixas granulométricas de interesse.....	56
Tabela 3.8: Cálculo das unidades de mineral útil nas faixas finas primárias de Nióbio de Bonga.....	57
Tabela 3.9: Cálculo das unidades metalúrgicas dos minerais nas faixas finas primárias.....	58
Tabela 3.10: Características da alimentação à concentração.....	59

INDICE DE FIGURA

Figura 0.1 - Problemática do Projecto.....	
14	
Figura 2.1: Elemento – Nióbio.....	
17	
Figura 2.2: Mineral Nióbio.....	
18	
Figura 2.3: Exemplo de uma curva granulométrica.....	
22	
Figura 2.4: Pilhas de Crivos utilizadas para o ensaio análise granulométrica por crivagem a húmido.....	23
Figura 2.5: Teste de sedimentação.....	26
Figura 2.6: Diâmetro efetivo.....	26
Figura 2.7: Representação da análise por fluorescência de raio-X.....	28
Figura 2.8: Exemplo de um Fluxograma do tratamento de um minério.....	
31	
Figura 2.9: Representação esquemática da coluna de flotação.....	35
Figura 2.10: Processos de transferência de massa dentro de uma célula de flotação.....	
35	
Figura 2.11: Separador de correias cruzadas.....	
39	
Figura 2.12: Separador de ímãs permanentes do laboratório da FEUAN – Minas.....	39
Figura 2.13: Separador de rolos induzidos de três estágios.....	
40	
Figura 2.14: Separador magnético a húmido de baixa intensidade.....	
41	
Figura 2.15: Separador magnético a húmido de alta intensidade.....	41
Figura 2.16: Liga Metálica.....	43

Figura 2.17: Turbina de um Avião.....	44
Figura 2.18: Máquina de ressonância magnética.....	44
Figura 3.1: Croquis de Localização.....	48
Figura 3.2: Nióbio de Bonga.....	49
Figura 3.3: Peso de ¼ da amostra usando a balança Explor Pro.....	49
Figura 3.4: Série de crivo.....	50
Figura 3.5: Ensaio experimental da análise granulométrica de crivagem a húmido.....	51
Figura 3.6: Amostra de nióbio após a secagem.....	51
Figura 3.7: Pesagem da amostra de nióbio após a crivagem.....	52
Figura 3.8: Amostra de nióbio agrupado em uma saqueta.....	52
Figura 3.9: Curva Granulométrica.....	54
Figura 3.10: Fluxograma de flutuação para concentração de nióbio e de fósforo.....	63

INDICE GERAL

INDICE	
EPIGRAFE	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
NOMENCLATURA	vi
LISTA DE TABELAS	vii
INDICE DE FIGURA	viii
CAPITULO I – INTRODUÇÃO	13
1.2 Problemática	14
1.3 Hipótese	15

1.4 Objectivos.....	15
1.4.1 Objectivo Geral.....	15
1.4.2 Objectivos Específicos	15
1. Identificar as faixas granulométricas de interesse no minério de Nióbio de Bonga..	15
2. Determinar a percentagem do mineral útil nas fracções finas primárias.....	15
3. Identificar as características da alimentação à concentração.....	15
4. Propor um fluxograma de flutuação para concentração de nióbio e de fósforo	15
1.5 Justificativa.....	15
1.6 Metodologia.....	16
1.7 Delimitação.....	16
CAPITULO II – ESTADO DA ARTE.....	17
2.1 Fundamentos do minério de Nióbio	17
2.2 Propriedades do Nióbio	19
2.2.1 Propriedades físicas do Nióbio	19
2.2.2 Propriedades químicas do Nióbio.....	20
2.3 Minérios de nióbio.....	20
2.4 Etapas do processo para o beneficiamento do Nióbio.....	21
2.5 Caracterização física dos minerais	22
2.5.1 Caracterização Granulométrica	22
2.5.1.1 Princípios da Análise Granulométrica.....	25
2.5.1.2 Técnicas usuais para realização da Análise Granulométrica.....	25
2.5.1.2.1 Análise Granulométrica por Crivagem a seco e a húmido	25
2.5.1.2.2 Análise Granulométrica por Sedimentação	26
2.5.2 Caracterização Química.....	28
2.5.2.1.1 Técnica de espectrometria de fluorescência de raio-X.....	29

2.6 Tratamento de Minérios	30
2.6.1 Concentração dos minerais.....	33
2.6.1.1 Concentração por Flutuação	33
2.6.1.2 Circuito de flutuação	35
2.6.1.2.1 Máquinas de flutuação.....	35
2.6.1.2 Concentração Magnética	40
2.6.1.2.1 Tipos de separadores magnéticos	40
2.6.2 Beneficiamento do Nióbio do ponto de vista técnico e económico	44
2.7 Utilização do mineral nióbio	44
2.7.1 Liga metálica	45
2.7.2 Superliga.....	45
2.7.3 Ímãs Supercondutores	46
CAPÍTULO III – DESENVOLVIMENTO.....	47
3.1 Estudo de Caso	47
3.1.1 Caracterização do minério de Bonga.....	47
3.1.1.1 Características geológicas e mineralógicas do nióbio de Bonga.....	47
3.1.1.2 Características químicas do nióbio de Bonga.....	48
3.1.2 Densidade do sólido.	49
3.1.3 Localização geográfica	50
3.2 Análise granulométrica por crivagem a húmido da amostra do minério tal qual (Nióbio de Bonga – Huíla)	50
3.2.1. Pesagem da Amostra inicial	51
3.2.2. Análise Granulométrica por Crivagem a húmido do nióbio.....	52
3.2.3. Resultados da Análise Granulométrica por Crivagem a húmido do nióbio	54
3.3 Análise química do Nióbio de Bonga.....	57

3.4 Identificação das faixas granulométricas de interesse do minério de Nióbio de Bonga	58
3.5 Determinação da percentagem de mineral útil nas faixas finas primárias do Nióbio de Bonga.....	60
3.6 Características da alimentação à concentração.....	61
3.7 Características dos Circuitos de flutuação.....	61
3.7 Fluxograma Proposto para a recuperação de nióbio e de fósforo por flutuação	65
CAPITULO IV - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS ULTERIORES	69
4.1 Conclusões.....	69
4.2 Sugestões para Desenvolvimentos Ulteriores.....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
ANEXOS	72
ANEXO I.....	72
ANEXO II.....	73
ANEXO III	76

CAPITULO I – INTRODUÇÃO

Os bens minerais têm uma importância significativa para a sociedade, a tal ponto que as fases de evolução da humanidade são divididas em função dos tipos de minerais utilizados: idades da pedra, do bronze, do ferro, etc. Estes bens são transformados em produtos para diversas finalidades fundamentais para o desenvolvimento socioeconómico, com destaque para a utilização nas indústrias agrícolas, de construção civil, automobilísticas e de alta tecnologia.

O Tratamento de Minérios compreende a separação seletiva de minerais por meio de operações unitárias, que se baseiam nas diferenças de propriedades entre o mineral útil e os minerais de ganga. Entre estas propriedades destacam-se: massa específica (ou densidade), susceptibilidade magnética, condutividade elétrica, propriedades físico-químicas de superfície, cor, radioatividade, forma, etc. Em muitos casos, também se requer a separação seletiva entre dois ou mais minerais de interesse.

O estudo das características metalúrgicas de minérios é fundamental para otimizar os processos de tratamento de minérios, sobretudo em depósitos de importância econômica como o de bonga, na província da Huíla. A flutuação como uma das técnicas de beneficiamento é amplamente utilizada na indústria mineral, desempenha um papel crucial na separação e concentração de minerais valiosos, permitindo a maximização da recuperação e a melhoria da qualidade do concentrado final.

A relevância desse estudo se insere no contexto de uma maior eficiência na produção, visando a um melhor aproveitamento dos recursos minerais da região, garantindo sustentabilidade e competitividade no mercado. Além disso, a análise das variáveis que influenciam o processo de flutuação, como a granulometria, a composição mineralógica e os reagentes utilizados, será discutida com base em ensaios realizados. Estes resultados permitirão estabelecer diretrizes para futuras operações de flutuação em larga escala, com o intuito de maximizar a recuperação dos minerais de interesse, minimizando os impactos ambientais e os custos operacionais.

1.1 Enquadramento

O minério de Nióbio de Bonga é de origem secundária, resultante de fenómenos de meteorização à superfície terrestre, sendo por isso não consolidado, isto é, friável. Os principais minerais identificados foram minerais de Nióbio, de Ferro, de Fósforo, de Feldspato e de Caulino. Sendo o minério friável, é importante conhecer a distribuição granulométrica do mineral de nióbio.

1.2 Problemática

A natureza laterítica do minério implica à existência de uma grande quantidade de finos, que constitui um problema implicando um esquema de flutuação complexo.

Problemática Geral: A proposta para o beneficiamento do nióbio por flutuação, será viável levando em conta as características metalúrgicas do concentrado?

Quem? - MIREMPET e Instituições do sector mineiro

O quê? - Flutuação para concentração de nióbio

Porquê? - A maior concentração do nióbio encontra-se em finos, e o uso da flutuação poderá recuperar uma maior percentagem.

Quando

Como?

Onde?

Figura 0.1:Problemática do Projecto. [Fonte: Os Autores]

1.3 Hipótese

A flutuação é considerada a mais versátil e eficiente técnica de beneficiamento de minérios, sendo também a mais complexa. Com as características metalúrgicas do concentrado da flutuação bem definidas, teremos como eficiência a maior recuperação do minério de nióbio.

1.4 Objectivos

1.4.1 Objectivo Geral

Este trabalho tem como objectivo determinar as características metalúrgicas do concentrado da flutuação.

1.4.2 Objectivos Específicos

1. Identificar as faixas granulométricas de interesse no minério de Nióbio de Bonga.
2. Determinar a percentagem do mineral útil nas fracções finas primárias
3. Identificar as características da alimentação à concentração
4. Propor um fluxograma de flutuação para concentração de Nióbio e de Fósforo

1.5 Justificativa

A concentração de minérios ocorre quando é preciso separar os minerais de interesse dos que não o são. Para que essa separação ocorra, é preciso que os minerais de interesse não estejam fisicamente agregados aos que não são de interesse, daí a importância das etapas de fragmentação e classificação, que realizam e monitoram essa separação.

Actualmente, a flutuação é o processo dominante no tratamento de quase todos os tipos de minérios, devido à sua grande versatilidade e seletividade. Permite a obtenção de concentrados com elevados teores e expressivas recuperações. É aplicado no beneficiamento

de minérios com baixo teor e granulometria fina, e o minério de Nióbio, enquadra-se nestas características.

1.6 Metodologia

Determinar a distribuição granulométrica do principal mineral, através de análise granulométrica por crivagem e quantificar a presença do mineral principal em cada uma das faixas granulométricas obtidas.

O primeiro passo foi uma revisão bibliográfica detalhada para entender os conceitos, e as técnicas que já são usadas nos demais mercados e indústrias extrativas. Esta revisão também ajudará a entender todo o processo envolvido no beneficiamento do minério.

Em seguida, foi feita a análise granulométrica do nosso minério, de modo a separá-los nas mais diversas classes, para auxiliar na identificação da faixa granulométrica de interesse no minério de Nióbio de Bonga.

Uma vez obtidas as classes granulométricas, seguiu de uma análise química, para obtermos os valores dos principais constituintes do minério, e os seus traços, e propor uma classe ideal para a concentração de nióbio e de fósforo por flutuação.

1.7 Delimitação

O presente trabalho está delimitado à apresentação de contribuições para o cálculo das características metalúrgicas do concentrado do minério de Nióbio, identificando as faixas granulométricas de interesse, os seus parâmetros técnicos (características da alimentação à concentração), as percentagens do mineral útil, assim como propor um esquema de flutuação para a concentração do nióbio e do fósforo.

CAPITULO II –ESTADO DA ARTE

2.1 Fundamentos do minério de Nióbio

O Nióbio é um metal raro e valioso que também já despertou o interesse de Angola para a sua exploração.

O Nióbio foi descoberto pelo químico inglês **Charles Hatchett** em 1801, a partir de estudos do mineral columbita. Ele nomeou o novo elemento encontrado de columbium (Cb). Posteriormente, em 1846, de forma independente, o químico Alemão **Henrich Rose** descobriu o elemento e nomeou-o de **Nióbio**, nome adotado pela comunidade internacional a partir de 1950.

Ao comparar com as demais substâncias presentes na natureza, o nióbio tem baixa concentração, na proporção de 24 partes por milhão.

Esse metal é encontrado nos seguintes países: Brasil, Angola, Canadá, Austrália, Egito, República Democrática do Congo, Groenlândia, Rússia, Finlândia, Gabão e Tanzânia.

Na década de 50, a maior jazida do minério pirocloro, contendo esse metal, foi descoberta no Brasil pelo geólogo brasileiro Djalma Guimarães.

A grande quantidade de minérios que contém o nióbio está localizada no Brasil, maior produtor mundial, que detém mais de 90% das reservas do metal.

As reservas exploradas estão localizadas nos estados de Minas Gerais, Amazonas, Goiás e Rondônia. O Nióbio (Nb) é o elemento químico de número atômico 41 pertencente ao grupo 5 da tabela periódica (vide fig.2.1).

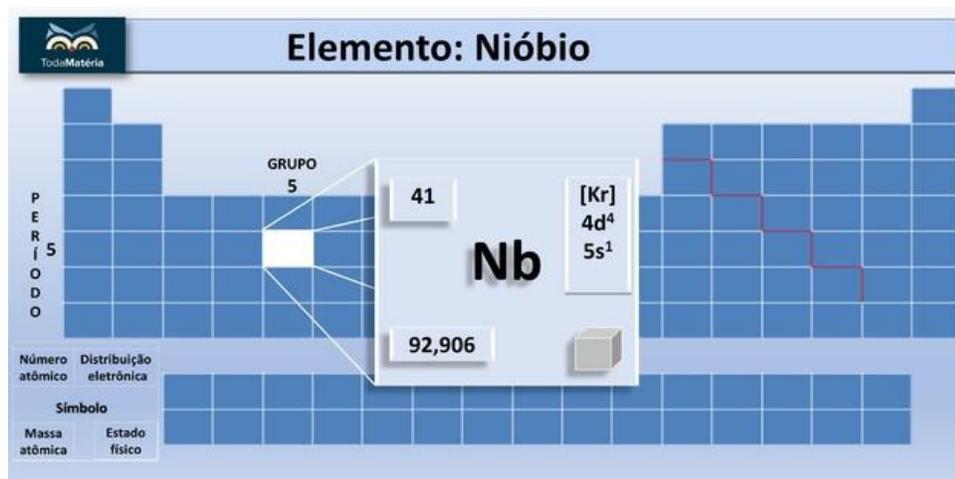


Figura 2.1: Elemento – Nióbio [Fonte: CMMBS – Fotos]

Os minerais que contêm nióbio são raros no mundo, contudo Brasil contém as maiores reservas desses minerais. Devido às suas propriedades, alta condutividade e resistência à corrosão, esse elemento tem muitas aplicações que vão desde a produção de ligas até a fabricação de foguetes espaciais.

O **Nióbio** é um elemento de ocorrência natural. Ele é um metal macio, seguro e disponível, além de ser dúctil, maleável e altamente resistente à corrosão. Por sua característica de aprimorar propriedades e funcionalidades, o nióbio é usado em uma grande variedade de materiais e de aplicações.

Nióbio é um metal refratário, ou seja, muito resistente ao calor e ao desgaste.

O Nióbio ocorre na natureza em minerais, geralmente ligado a outros elementos.



Figura 2.2: Mineral Nióbio [Fonte: Mundo Educação]

2.2 Propriedades do Nióbio

O Nióbio tem como propriedade a baixa aderência de neutrões termiais, tornando-se, portanto, muito útil em indústrias nucleares. Em contrapartida, esse elemento, em baixas temperaturas, torna-se um supercondutor elétrico.

Possui uma resistência em ligas metálicas. Além da resistência, o nióbio possui alto ponto de fusão. Apenas uma quantidade, em gramas desse elemento pode modificar uma tonelada de ferro, fazendo com que o metal se torne mais leve, resistente à corrosão e mais eficiente.

2.2.1 Propriedades físicas do Nióbio

Tabela 2.1: Propriedades físicas do Nióbio.

Estado físico	sólido à temperatura ambiente
Cor e aparência	cinzento metálico
Densidade	8,570 g/cm ³
Ponto de fusão	2468 °C
Ponto de ebulição	4742 °C
Estrutura cristalina	Cúbica de Corpo Centrado – CCC
Condutividade térmica	54,2 W m ⁻¹ K ⁻¹

[Fonte: CMMB]

2.2.2 Propriedades químicas do Nióbio

Tabela 2.2: Propriedades químicas do Nióbio. **Fonte:** *CMMB*

Classificação	Metal de transição
Número atômico	41
Bloco	D
Grupo	5
Período	5
Peso atômico	92,90638 u
Raio atômico	1,429 Å
Íons comuns	Nb ⁵⁺ e Nb ³⁺
Eletronegatividade	1,6 Pauling

Fonte: *CMMB*

2.3 Minérios de nióbio

O Nióbio é encontrado na natureza sempre ligado a outros elementos químicos. Já se tem conhecimento de mais de 90 espécies minerais contendo nióbio e tântalo na natureza.

Na tabela abaixo, podemos observar alguns dos minérios que contêm nióbio, as principais características e o teor de nióbio disponível em cada material.



Composição	$(\text{Na}_2, \text{Ca})_2(\text{Nb}, \text{Ti})(\text{O}, \text{F})_7$
Teor de nióbio (máximo)	71% Nb_2O_5
Características	<ul style="list-style-type: none"> » Mineral isométrico de hábito octaédrico » Densidade relativa de 4,5 g/cm^3 » Possui a variedade bariopirocloro, que inclui o elemento bário em sua composição.

Composição	$(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$
Teor de nióbio (máximo)	76% Nb_2O_5
Características	<ul style="list-style-type: none"> » Mineral ortorrômbico » Densidade relativa de 5,2 a 8,1 g/cm^3 » Forma e estruturas semelhantes, nas quais o tântalo e o nióbio se substituem em todas as proporções.

Tabela 2.3: Características da Piroclorita (à esquerda) e Columbita – Tantalita (à direita). [Fonte: CMMB]

2.4 Etapas do processo para o beneficiamento do Nióbio

Os minérios de Nióbio passam por transformações até que sejam formados os produtos que serão comercializados.

As etapas do processo de beneficiamento podem ser resumidas em:

- ❖ Mineração
- ❖ Concentração de Nióbio
- ❖ Refinação de Nióbio

A **mineração** ocorre onde estão as reservas de minérios, a sua extração não necessita do uso de explosivos por causa da sua natureza. É geralmente transportado por correias para onde ocorre a etapa de concentração.

A **concentração** ocorre com a desagregação do minério, a moagem é feita em circuito fechado directo com hidrociclones como unidade de controlo da redução. A moagem faz com que os cristais do minério se tornem bem mais finos e utilizando a **separação magnética** as fracções de ferro são retiradas do minério.

O produto da moagem vai para o processo de deslamagem, com o objectivo de se eliminar a quantidade de lamas finas que poderiam causar um impacto negativo na concentração por flutuação. O processo de flutuação ocorre geralmente em dois estágios, um composto por material grosseiro e o outro estágio por material fino

Na **refinação** do nióbio ocorre a remoção de teores de enxofre, água, fósforo e chumbo.

Esse processo é chamado de **aluminotermia** em que o concentrado do minério é misturado em reatores com sucata de ferro ou óxido de ferro. Os óxidos metálicos reagem com o alumínio sob elevadas temperaturas, gerando o produto de interesse.

2.5 Caracterização física dos minerais

2.5.1 Caracterização Granulométrica

A caracterização granulométrica é a determinação das dimensões das partículas do agregado e de suas respectivas percentagens de ocorrência.

O principal objetivo é conhecer a distribuição granulométrica do agregado e representá-la através de uma curva (vide figura 2.3). Possibilitando assim a determinação das dimensões das partículas do agregado.

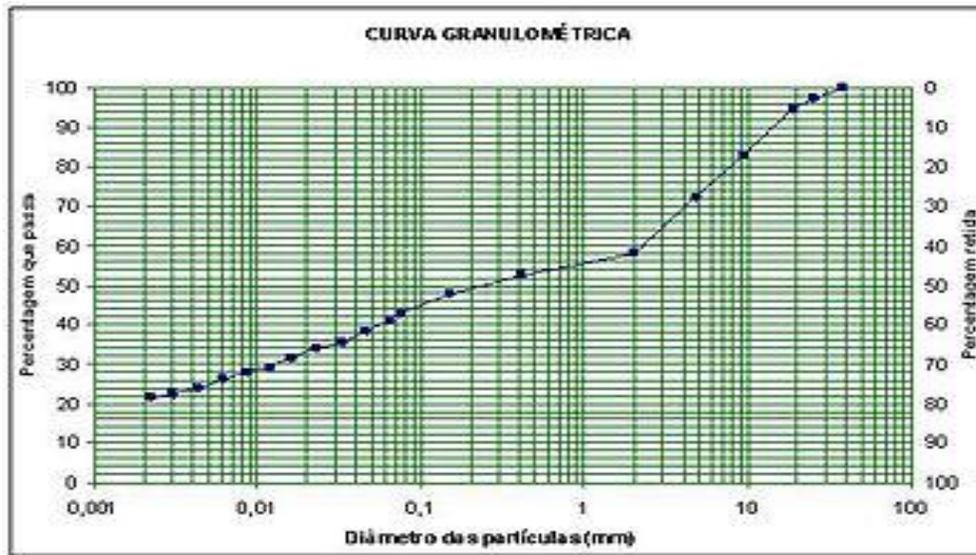


Figura 2.3: Exemplo de uma curva granulométrica. [Fonte:wikipedia]

Compreende o estudo dos métodos que estabelecem a distribuição de tamanhos das partículas em um material granulado ou produto fragmentado em função das respectivas massas.

Tal processo pode ainda ser dividido em nomenclatura de crivagem a grosso, para partículas maiores que 2mm, e crivagem fina, para partículas menores que tal diâmetro.

Inicialmente, prepara-se uma amostra do minério, que é secado em estufa e pesado. Em seguida, essa amostra é colocada no crivo de maior abertura.



Figura 2.4: Pilhas de Crivos utilizadas para o ensaio de análise granulométrica por crivagem. A série de crivos é empilhada de forma que o crivo com maior abertura fica acima da peneira com abertura imediatamente menor e assim sucessivamente.
[Fonte: Website Guia da engenharia]

É comum chamarmos os crivos pelo seu número de malha, por exemplo #10 ou #200. Esse valor representa o número de aberturas que a malha possui em uma polegada quadrada.

Ou seja, a crivo #200 tem muitos mais aberturas numa pequena área, logo, é um crivo mais fina do que a #10.

Então, essa série é colocada em um vibrador, para que o mesmo auxilie na melhor separação das fracções da amostra.

Ao final da análise granulométrica por crivagem, haverá uma fracção da amostra “presa” em cada peneira, onde a fracção mais grossa fica nas peneiras superiores e as mais finas ficam nas peneiras inferiores.

Então, é pesada a fração da amostra que ficou em cada crivo. De posse desses dados, é feito um gráfico, onde na abcissa é representado o diâmetro das partículas, em escala logarítmica, e nas ordenadas é representada a percentagem de peso das partículas que passaram ou que foram retidas em cada crivo por meio de uma escala linear.

2.5.1.1 Princípios da Análise Granulométrica

A determinação do tamanho das partículas e suas respectivas percentagens de ocorrência, permitem obter a distribuição das partículas das amostras e é denominada **distribuição granulométrica**.

A distribuição granulométrica dos materiais granulares, areias e pedregulhos, será obtida por meio do processo de crivagem de uma amostra, enquanto, para siltes e argilas se utiliza à sedimentação dos sólidos no meio líquido. Para amostras (solos, minerais e agregados), que têm partículas tanto na fração grossa (areia e pedregulho) quanto na fração fina (silte e argila) torna-se necessária a análise granulométrica completa (peneiramento e sedimentação). As partículas de uma amostra (solos, sedimentos, minerais e agregados) grossa ou fina, não são esféricas, mas se usará sempre a expressão diâmetro equivalente da partícula ou apenas diâmetro equivalente, quando se faz referência ao seu tamanho. Para os materiais granulares ou fração grossa de solo, mineral ou agregados, o diâmetro equivalente será igual ao diâmetro da menor esfera que circunscreve a partícula, enquanto para a fração fina este diâmetro é o calculado através da lei de Stokes.

2.5.1.2 Técnicas usuais para realização da Análise Granulométrica

- ❖ Análise Granulométrica por Crivagem – a seco ou a húmido.
- ❖ Análise Granulométrica por Sedimentação – lei de Stokes.

2.5.1.2.1 Análise Granulométrica por Crivagem a seco e a húmido

A Análise Granulométrica por crivagem é um dos métodos mais antigos na área de processamento mineral e, até hoje, é usado com aplicação comprovada em uma variedade de indústrias e nas mais diferentes áreas.

A Análise Granulométrica por crivagem poderá ser realizada através de crivos vibratórios a seco ou a húmido, através de equipamentos de bancada, e crivagem manual. A escolha da técnica adequada de análise granulométrica por crivagem dependerá de características intrínsecas aos minérios, como: percentagem de finos, humidade, etc.

As técnicas de análise granulométrica por crivagem com suas vantagens e restrições são dispostas a seguir:

Análise Granulométrica por Crivagem a seco

Na análise granulométrica por crivagem a seco as partículas rolam sobre a tela de crivo, sendo expostas às aberturas das mesmas repetidas vezes, havendo assim uma disputa probabilística da partícula para encontrar uma abertura na tela de crivo. A crivagem a seco é indicada para materiais com granulometria maior, e menores quantidade de amostras.

Este método de análise granulométrica é o de mais fácil operação. Apresenta restrições quanto a materiais com alta percentagem de finos (em geral $> 10\%$ abaixo de $0,037\text{ mm}$ e humidade $>5\%$), devido ao fator de agregação promovido pela humidade e aumento da massa. Produz poeira que pode influenciar na perda de partículas.

Análise Granulométrica por Crivagem a húmido

Neste tipo de análise granulométrica por crivagem adiciona-se água ao material que será colocado nas telas, posteriormente as partículas são transportadas pelo fluido e passam pelas aberturas das telas dos crivos. A análise granulométrica por crivagem a húmido é indicada para materiais que já se encontram na forma de suspensão ou que apresentam tendência à formação de agregados.

Este método de análise granulométrica por crivagem é mais moroso que o seco, requerendo grande quantidade de água. Por causa da formação de polpa, reduz as perdas de partículas que poderiam ser causadas pela agitação dos crivos num processo a seco.

2.5.1.2.2 Análise Granulométrica por Sedimentação

Para solos finos, como os siltes e argilas, o melhor ensaio para determinar os valores de diâmetro média é o ensaio de sedimentação.

Mas vale lembrar que esse processo pode ser utilizado para qualquer material com diâmetro menor que 2 mm .

De maneira bem resumida tal ensaio consiste em deixar sedimentar uma pequena amostra de solo em um becker, por um período de tempo específico.

Com o auxílio de um densímetro, é aferida a densidade da solução com a amostra de solo ao longo do tempo de ensaio.

A partir da utilização da lei de Stokes, é possível determinar o diâmetro máximo das partículas presentes na amostra de solo.



Figura 2.5: Teste de análise granulométrica por sedimentação [Fonte: Website guia da engenharia]

Diâmetro efetivo: podemos dizer que apenas 10% da amostra tem diâmetro inferior ao diâmetro efetivo. Ou seja, podemos determinar esse diâmetro a partir da curva granulométrica. Na curva apresentada abaixo, por exemplo, podemos afirmar que o diâmetro efetivo é pouco mais de 0,04 mm.

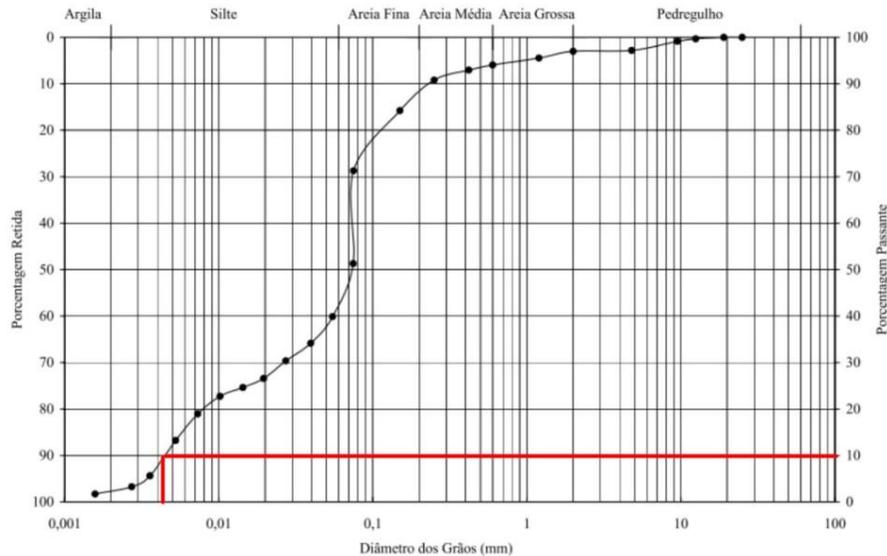


Figura 2.6:Diâmetro efetivo [Fonte:Guia da engenharia]

2.5.2 Caracterização Química

Os minerais são compostos químicos com uma determinada composição química e uma estrutura cristalina definida,

A caracterização química é o conjunto de ensaios que garante inequivocamente a autenticidade e qualidade da substância, no que se refere a sua identidade, pureza e teor.

2.5.2.1 Análise química

Análise química é o conjunto de técnicas de laboratório utilizadas para a identificação das espécies químicas envolvidas em uma reação, como também a quantidade dessas espécies.

As análises químicas podem ser realizadas de três diferentes formas:

- Quantitativamente;
- Qualitativamente;
- Imediata.

Análise imediata: consiste em isolar as espécies que constituem o material, esse isolamento pode ser feito manualmente. Por exemplo, se queremos analisar uma amostra sólida e esta estiver inserida em um meio líquido, é preciso retirar este sólido do meio aquoso;

Análise qualitativa: essa etapa identifica a composição do material, é preciso instrumentos apropriados para executar este procedimento. O resultado neste caso pode ser obtido pela mistura de outro componente à mistura.

Análise quantitativa: é a análise mais criteriosa, além de saber do que se trata o material ainda é preciso saber a quantidade do componente em questão dentro da amostra.

Durante a análise química são usadas diversas técnicas para se conseguir os resultados desejados. Destas iremos destacar a técnica de espectrometria de fluorescência de raio-X.

2.5.2.1.1 Técnica de espectrometria de fluorescência de raio-X

Actualmente a técnica de espectrometria de fluorescência de raio-X é frequentemente utilizada para determinar a composição de minerais por ser um método rápido e preciso. A espectrometria de fluorescência de raio-X por energia dispersiva permite identificar os elementos químicos presentes em uma amostra, assim como estabelecer a proporção de cada elemento.

Através da emissão de raios-X na amostra, se um fóton incidente tem energia suficiente para expulsar um elétron da camada mais interna, o átomo se torna instável. Para o átomo se estabilizar, um elétron de uma camada mais externa preenche o ‘buraco’ e essa transição produz radiação característica permitindo a identificação e quantificação dos elementos presentes no material.

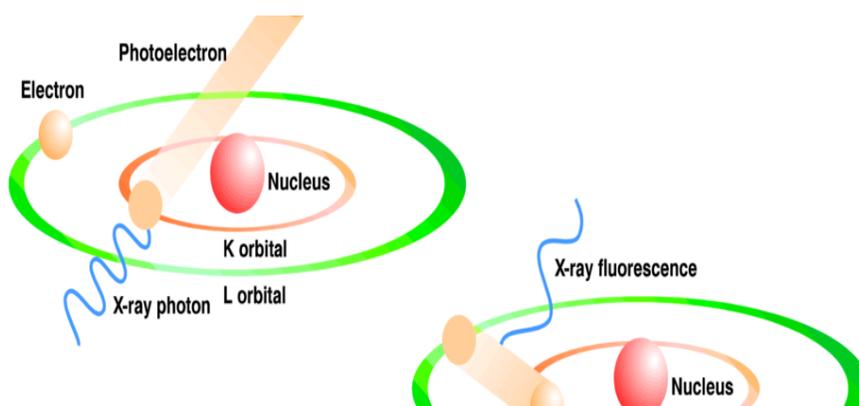


Figura 2.7: Representação da análise por fluorescência de raio-X. [Fonte: Safira - soluções minerais]

A fluorescência de raio-X (XRF) é uma técnica comparativa. A intensidade do sinal gerado por um elemento da amostra deve ser comparada com a de um padrão de composição conhecida, a fim de determinar a concentração do elemento. Para a análise de minerais por XRF, a heterogeneidade da amostra devido à segregação, tamanho do grão e efeitos mineralógicos influenciam a intensidade dos raios X e podem causar erros de análise. Portanto, recomenda-se analisar amostras pulverizadas. Posteriormente, a amostra pode ser prensada para formar uma pastilha prensada, o qual é um método de preparação rápido e barato. No entanto, quando a não homogeneidade não puder ser suficientemente removida por pulverização e for necessária uma análise mais exacta, é aconselhável o método de pastilhas de fusão.

Recuperação e pureza são dois conceitos muito importantes quando se trata de concentração de minérios e o ponto de equilíbrio entre eles é a chave do processo de beneficiamento. A recuperação mede a quantidade de elemento valioso que se conseguiu obter no processo de concentração do minério, já a pureza é medida pelo teor do elemento valioso presente no minério.

Para que seja possível o processo de concentração é necessário que haja uma diferença física ou físico-química entre o mineral de interesse e os materiais que vão ser eliminados. A complexidade dessa diferença irá depender dos minerais que estão sendo trabalhados.

Pode-se pensar que a etapa de concentração mineral se trata apenas de um gasto adicional, porém, assim como todo o beneficiamento, ela é realizada com o objetivo de maximizar os resultados. O facto de se eliminar materiais sem interesse, além de aumentar o teor do minério, também resultará em diminuições de custos. Com a produção dos concentrados de minério são obtidas: economias com transporte, reduções de despesas metalúrgicas, menores perdas de metal nas escórias (impurezas eliminadas na metalurgia) de entre outros.

2.6 Tratamento de Minérios

Tratamento ou Beneficiamento de Minérios consiste em operações – aplicadas aos bens minerais – visando modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, sem, contudo, modificar a identidade química ou física dos minerais.

As operações de concentração – separação seletiva de minerais – baseiam-se nas diferenças de propriedades entre o mineral útil e os minerais de ganga. Entre estas propriedades destacam-se: massa específica (ou densidade), susceptibilidade magnética, condutividade elétrica, propriedades físico-químico de superfície, cor, radioatividade, forma etc. Em muitos casos, também se requer a separação seletiva entre dois ou mais minerais de interesse.

Para um minério ser concentrado, é necessário que os minerais estejam fisicamente libertados. Isto implica que uma partícula deve apresentar, idealmente, uma única espécie mineralógica.

Para se obter a libertação do mineral, o minério é submetido a uma operação de redução de tamanho – cominuição, isto é, britagem e/ou moagem –, que pode variar de centímetros até micrómetros. Como as operações de redução de tamanho são caras (consumo de energia, meio moedor, revestimento etc.), deve-se fragmentar só o estritamente necessário para a operação seguinte. Para evitar uma cominuição excessiva, faz-se uso de operações de separação por tamanho ou classificação (análise granulométrica por crivagem, ciclone, etc.), nos circuitos de cominuição. Uma vez que o minério foi submetido à redução de tamanho, promovendo a liberação adequada dos seus minerais, estes podem ser submetidos à operação de separação das espécies minerais, obtendo-se, nos procedimentos mais simples, um concentrado e um rejeito.

O termo concentração significa, geralmente, remover a maior parte da ganga (parte não útil), presente em grande proporção no minério (produto de maior valor) aumentando o seu teor. A purificação, por sua vez, consiste em remover do minério (ou pré-concentrado) os minerais contaminantes que ocorrem em pequena proporção. Na maioria das vezes, as operações de concentração são realizadas a húmido. Antes de se ter um produto para ser transportado, ou mesmo adequado para a indústria química ou para a obtenção do metal por métodos hidro-pirometalúrgicos (áreas da Metalurgia Extrativa), é necessário eliminar parte da água do concentrado. Estas operações compreendem desaguamento (espessamento e filtração) e secagem.

Existem vários processos para a concentração de minérios e a escolha de qual será utilizado dependerá das propriedades dos materiais em questão. Algumas das principais técnicas

utilizadas para a concentração mineral são: **Concentração Gravítica, Flutuação, Separação Magnética, Lixiviação, Separação Eletrostática e Seleção Manual**

Os fluxogramas são formas gráficas de se representar todo o processo de tratamento de um minério. Nas etapas de britagem, moagem, crivagem e classificação, ocorre a redução e padronização da granulometria do mineral de acordo com a liberação recomendada pela sua mineralogia.

Partindo para a concentração, onde ocorre a separação da ganga do mineral útil, com base em factores como o peso específico, susceptibilidade magnética, condutividade elétrica, química de superfície entre outras.

Por fim, após a separação, o concentrado passa pelo espessamento, filtragem e secagem até se tornar o produto final, enquanto que o rejeito pode ser dispersado de varias formas, como disposto em barragem de rejeito, enchimento de cavas ou galerias subterrâneas.

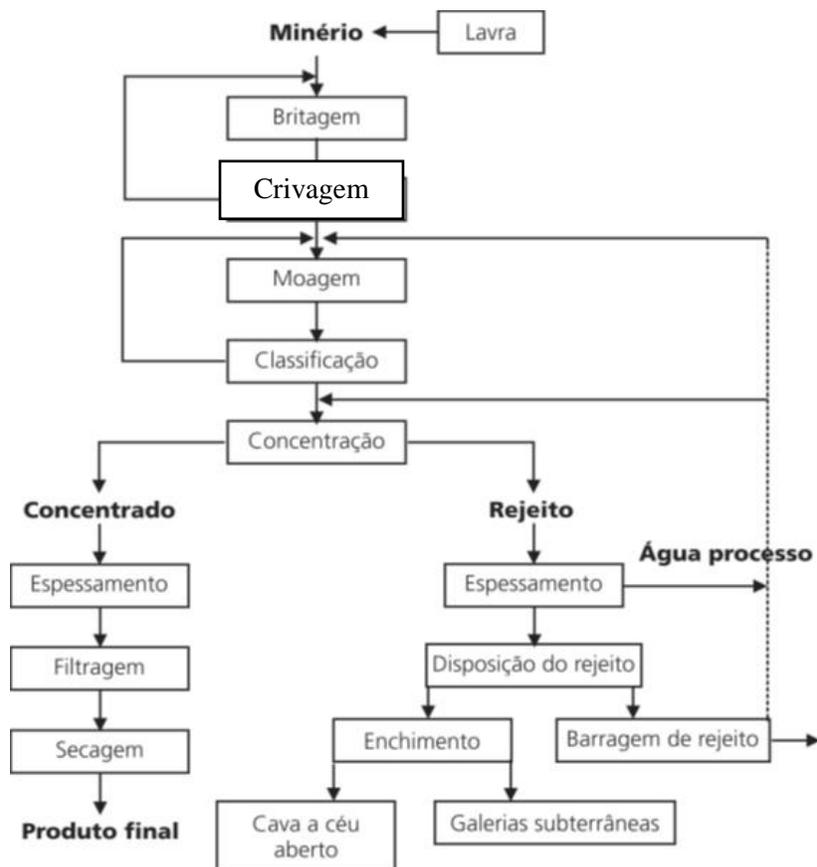


Figura 2.8: Exemplo de um Fluxograma do tratamento de um minério.

[Fonte: Acervo Cristal]

2.6.1 Concentração dos minerais

A concentração mineral encontra-se na parte final do beneficiamento, ela consiste na selecção dos minerais de interesse e eliminação das espécies indesejáveis, buscando aumentar o teor do minério. Para que possa ser concentrado com sucesso, o minério deve estar bem libertado e classificado. Ao final da etapa de concentração tem-se dois produtos: o concentrado (produto de maior valor) e o rejeito (produto inútil).

2.6.1.1 Concentração por Flutuação

A flotação é um processo de concentração dos mais utilizados na indústria mineral, e se baseia na separação seletiva dos constituintes através da diferença entre as propriedades de superfície dos minerais contidos no minério e previamente libertados.

Existem três tipos de flutuação que são:

- Flutuação em espuma (tipo de flutuação usado nas indústrias);
- Flutuação Pelicular;
- Flutuação em óleo.

Processo de separação por flotação é baseado no controle das propriedades hidrofóbicas, (ou/e hidrofílicas) diferenciais dos minerais que se encontram dispersos numa polpa, através da utilização de reagentes químicos específicos.

- **Hidrofília:** Propriedade para entrada (permanência) do mineral na água;
- **Hidrofóbicas:** Propriedade para saída do mineral na água, indo para o ar formando espuma.

Nesse método de separação, partículas sólidas presentes em um meio líquido são arrastadas e separadas por bolhas de ar introduzidas no processo, enquanto às partículas indesejadas continuam na fase aquosa. As propriedades físicas e químicas das espécies presentes em solução são responsáveis por todo processo. Num sistema de flotação, existem três fases: líquida, sólida e gasosa. A fase líquida é composta pelas partículas que se deseja separar. Segundo Santana (2007), a fase líquida é sempre a água e a fase gasosa é o ar.

Quando as propriedades de entrada e saída na água não são suficientes, utilizam-se reagentes como colectores, modulantes e modificadores. Esses reagentes fazem com que os minerais adiram ou não a bolha (saindo ou permanecendo na água) modificando suas propriedades minerais.

Os reagentes denominados colectores, modificadores e modulantes são substâncias orgânicas, que do ponto de vista químico são denominadas surfactantes. Diferenciam-se mediante a sua acção nos minerais, sendo sua variação de acordo a cada espécie mineralógica

As máquinas onde são misturados os reagentes que preparam os minerais para que possam se tornar hidrofóbicas ou hidrofílicas são denominadas de **condicionadores**.

Existem também os chamados **reagentes espumantes** que fazem com que as bolhas não rebentem facilmente fazendo com que haja uma certa durabilidade e estabilidade das espumas. Os principais agentes espumantes são: **Óleo de pinho, ácidos gresilícos e álcool alifáticos**. Esses reagentes são misturados nas máquinas de flutuação.

A flutuação pode ser directa ou inversa. Na flutuação directa a espécie útil se concentra na espuma e na flutuação inversa o concentrado sai na parte de baixo, concentrando-se na polpa.

Mediante aos mecanismos envolvidos no processo de flutuação (colisão, adesão, estabilidade e levitação), podem nesta etapa serem afectados (influenciados) por uma série de variáveis.

As principais variáveis que influenciam o processo de concentração por flutuação e que podem ser manipuladas, são:

- Dosagem e condicionamento dos reagentes;
- Valor do pH;
- Vazão de ar e profundidade da espuma;
- Holdup do ar;
- Tempo de residência;
- Concentração de sólidos;
- Tamanho das bolhas;

- Velocidade do rotor (somente em células mecânicas);
- Tamanho das partículas;
- Água de lavagem (somente em coluna de flutuação).

2.6.1.2 Circuito de flutuação

O circuito de flutuação é um fluxograma que representa o processo que vai decorrer na concentração por flutuação.

Este circuito começa com a representação resumida das operações de cominuição em que a massa que sai deste alimenta (passando antes pelos tanques condicionadores) a etapa a seguir, que são as máquinas de flutuação.

As máquinas de flutuação são células clássicas e as colunas que neste processo de flutuação, podem ser combinados ou não. A ordem é: Banco ou bateria de desbaste ou desgrossamento; esgotamento ou reclamação e apuramento ou apuramentos. É neste processo onde começa a recuperação das espécies mineralógicas, pois que deste processo resulta um concentrado e um rejeitado. Quando a recuperação não é completa é feita o apuramento, podendo ter 1 ou mais com o objetivo de aumento teor. Esta operação é feita em células de apuramento e, é alimentada com o concentrado do desgrossamento. Quando se quer recuperar espécie mineralógica vindo do produto do rejeitado do desbaste é feita uma reclamação que na maioria das vezes recebe 80% do produto recuperado na primeira etapa da flutuação.

2.6.1.2.1 Máquinas de flutuação

As máquinas de flutuação devem ser capazes de realizar uma série de funções simultâneas com o objetivo de obter uma maior eficiência no processo de concentração (manter as partículas minerais em suspensão, gerar e dispersar as bolhas de ar, colectar selectivamente e transportar o mineral de interesse).

Com o objetivo de aumentar a eficiência e reduzir os custos do processo de flutuação foram desenvolvidos e aperfeiçoados, ao longo dos anos, diferentes tipos de equipamentos. Essas podem ser divididas em três classes principais:

- Células mecânicas;
- Células pneumáticas;

➤ Coluna

Células mecânicas

Às células mecânicas foram as primeiras a serem desenvolvidas para utilização no processo de concentração de minerais por flutuação. Essas células apresentam uma característica básica uma secção retangular e a presença de um impelidor na parte central, cujo objetivo é de suspender as partículas minerais através da agitação da polpa na parte inferior da célula, promover a geração das bolhas de ar e o contacto partícula -bolha.

Células pneumáticas

As células pneumáticas foram desenvolvidas com o objetivo de suprir algumas deficiências das células mecânicas. A principal diferença das células pneumáticas com relação a célula mecânica deve -se à inexistência de impelidores para agitação da polpa, geração e dispersão das bolhas de ar na polpa, independente do sistema de agitação da célula.

Coluna de flutuação

A coluna de flutuação, por sua vez, não mistura os reagentes através da aceleração e agitação do meio aquoso e acontece em um veio ou coluna mais vertical do que horizontal e mais estreito do que a célula. Na coluna, borrifadores irão introduzir o ar e vão criar um fluxo destas bolhas com a atuação da gravidade, segmentando as substâncias.

A flotação através da coluna pode ser mais complexa e lenta do que a flotação celular, mas o desempenho metalúrgico sobre o metal separado é otimizado, com economia de energia e menos interferência humana e, via de consequência, industrial.

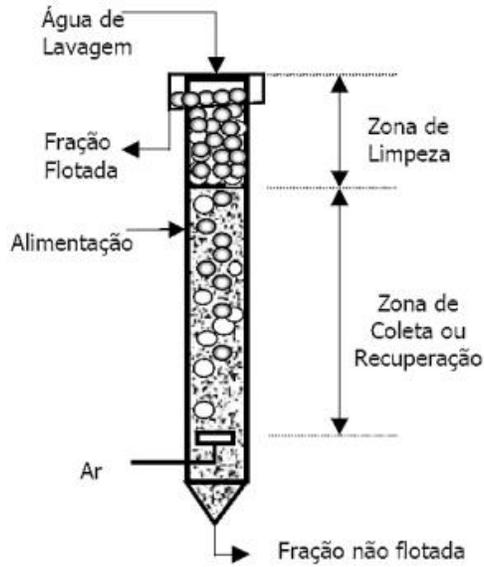


Figura 2.9: Representação esquemática da coluna de flotação
 [Fonte: Adaptado de Luz et al (2010)]

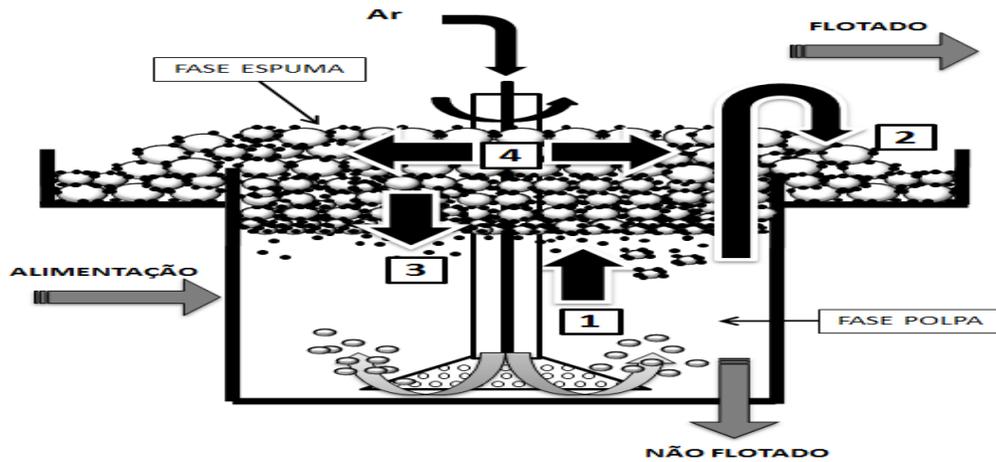


Figura 2.10: Processos de transferência de massa dentro de uma célula de flotação.
 Fonte: Ms-Flutuação.

Existem algumas diferenças entre as colunas de flutuação e as células, que podem ser:

- Na geometria (a coluna tem mais alturas e diâmetros que as células fazendo com que o seu tempo de residência seja maior);
- Na presença de água de limpeza na camada de espuma;
- Ausência de agitador mecânico (a coluna não tem agitadores mecânicos);
- Sistema de geração de bolhas.

Num sistema geral de flutuação teremos o processo cominuição (sendo que as partículas devem ser finamente subdivididas), posteriormente encontraremos os condicionadores, desengrossamento que dá dois produtos em que um vai na reclamação e o outro, no apuramento.

2.6.1.3 Processo pós flutuação.

O concentrado final do processo de flutuação resulta numa polpa ainda com partículas finas. Para recuperação desses finos são usados reagentes flocculantes que permitam a sua recuperação através da formação de flóculos e a respectiva sedimentação. Os processos de coagulação ou floculação, unindo partícula -partícula com o objetivo de tornar -las maiores.

A remoção da água geralmente faz-se em dois estágios:

1. Sedimentação (espessamento e clarificação);
2. Filtragem;

O Espessamento é a remoção da água do concentrado por sedimentação das partículas.

No processo de sedimentação das partículas, por acção da gravidade a polpa se retrai no fundo formando uma massa espessada (mais densa), tendo no início o líquido clarificado e a polpa inicial, ficando no processo intermédio. Neste processo remove-se 80% de água.

Os espessadores podem ser: cilíndrico, de lamela ou misto.

Existem dois métodos para o cálculo dos espessadores:

- Método Coe-Clevenger;
- Método de Telmag.

Filtragem

A filtração é uma operação de separação do sólido e do líquido, na sequência do espessamento. Consiste na passagem da polpa concentrada de minério ou rejeito, através de um meio filtrante, para que haja retenção do sólido e a passagem do líquido. Os meios filtrantes devem se caracterizar por oferecer mínima resistência ao fluxo do que está sendo filtrado, gerar baixa concentração de sólidos no que foi filtrado, não apresentar possibilidades de bloqueio, oferecer boas características de descarga, permitir a limpeza com água ou sopro de ar e ter boa resistência mecânica, química e biológica.

A filtração utilizada para a retirada de água de concentrados e rejeitos finais, além da de maximizar a recuperação de substâncias dissolvidas em processos hidrometalúrgicos. A filtração contínua, a vácuo, com formação de torta de minério, é a mais utilizada na indústria de mineração, através de filtros de tambor, de disco e horizontais. O desempenho de um filtro é avaliado nos seguintes aspectos: Humidade final de torta, entre 10% e 12%.

Neste processo remove-se até 90% de água.

Secagem

Os processos de secagem podem ser classificados de variadas formas, contudo os mais habituais para sólidos, são baseados em trocas de calor. Segundo os 19 métodos de troca de calor, os processos de secagem podem ser divididos em diretos, indiretos, infravermelho e dielétricos.

Na secagem por métodos diretos, a troca de calor é ocasionada pelo contato direto entre o sólido húmido e os gases quentes e também pode ser chamado de secagem por convecção.

Nos métodos indiretos, o calor é transmitido através de uma parede. A eficiência da secagem depende do calor oferecido e do contato entre o material húmido e as superfícies quentes e também podem ser chamados de secagem a condução.

No processo de secagem por infravermelho ou calor radiante, a operação dos processos a calor radiante depende da geração, da transmissão e da absorção dos raios infravermelhos.

Os processos de aquecimento dielétrico operam com o princípio da geração de calor dentro do sólido mediante a colocação deste num campo eletromagnético de frequência elevada.

Nos processos industriais de mineração a secagem é praticamente toda aplicada através nos métodos direto e indireto.

Neste processo remove-se até 95% de água, sobrando 5% para humidade da temperatura normal.

2.6.1.2 Concentração Magnética

Consiste em submeter as partículas minerais a ação de forças magnéticas e mecânicas submetidas num campo magnético, fazendo com que aconteça separação quando as forças magnéticas forem superiores que as forças mecânicas. Como resultado, as partículas correm trajetórias diferentes em função das suas propriedades.

As forças magnéticas aplicadas aos minerais variam mediante os calibres dessas mesmas substancias. Para os calibres grosseiros, por exemplo as forças magnéticas são menores comparando com as de calibre fino que exigem o aumento das forças magnéticas pelo aumento do gradiente.

Para este tipo de concentração o processo pode ser feito a seco ou à húmido.

2.6.1.2.1 Tipos de separadores magnéticos

O separador magnético pode ser de **alta intensidade** e de **baixa intensidade**. São aplicadas dependendo das propriedades magnéticas, suscetibilidade dos minerais. Sendo que a separação magnética e feita a húmido e a seco, desta feita os separadores podem ser:

Separador de correias cruzadas (separador a seco): possui um grande índice de seletividade. A faixa granulométrica alcançada varia de tamanhos de 1,65mm até 104 µm. Esse equipamento existe em várias versões, e pode ter mais de um estágio de separação dentro de um mesmo aparelho;

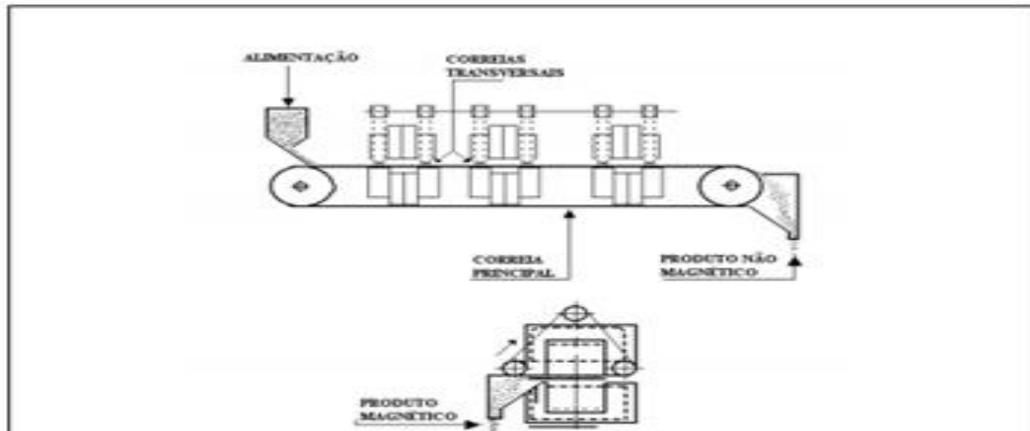


Figura 2.11: Separador de correias cruzadas. [Fonte:CETEM]

Separador de ímãs permanente (separador a seco): São usados principalmente para separar minerais ferromagnéticos. Com as mudanças e avanço das tecnologias, surgiu a possibilidade de utilizar campos magnéticos mais intensos, dando origem também a outros tipos de ímãs.

Os mesmos, produzem campos magnéticos estáveis, consomem baixa energia, e não apresenta necessidade de grandes correntes elétricas, sua desvantagem é a sensibilidade, a variação da temperatura e a pouca flexibilidade de variação de intensidade de campo.



Figura 2.12: Separador de ímãs permanentes do laboratório da FEUAN – Minas
[Fonte: Galeria do núcleo do departamento de minas – FEUAN]

Separador de rolo induzido (separador a seco): pode ser fabricado tanto na versão simples com apenas um rotor, que é a forma mais utilizada em laboratórios, quanto na versão mais complexa, com vários rotores. Ele é usado principalmente em situações que é necessário retirar as impurezas provenientes do processamento mineral, sejam elas magnéticas ou paramagnéticas. Suas limitações estão mais voltadas a questões como baixa flexibilidade, baixa capacidade por unidade, e faixa granulométrica baixa.

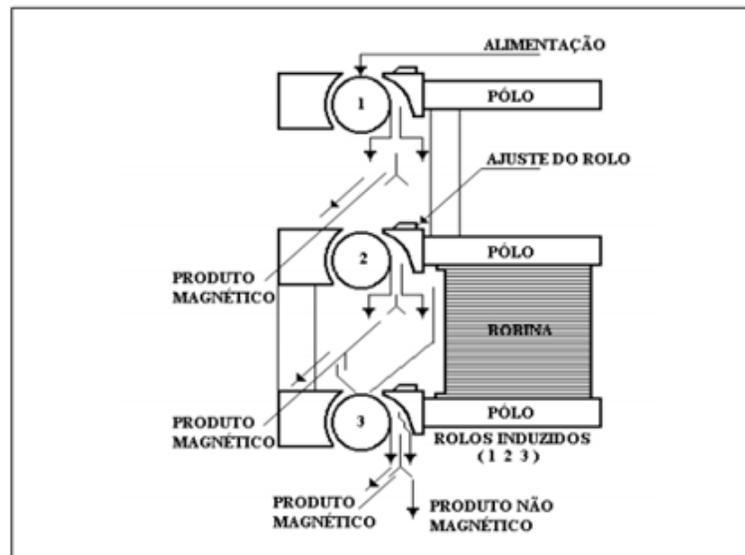


Figura 2.13:Separador de rolos induzidos de três estágios. [Fonte:CETEM]

Separador de tambor de baixa intensidade (separador à húmido): é usado para separar minerais ferromagnéticos, se o campo magnético for de até 0,2 T.

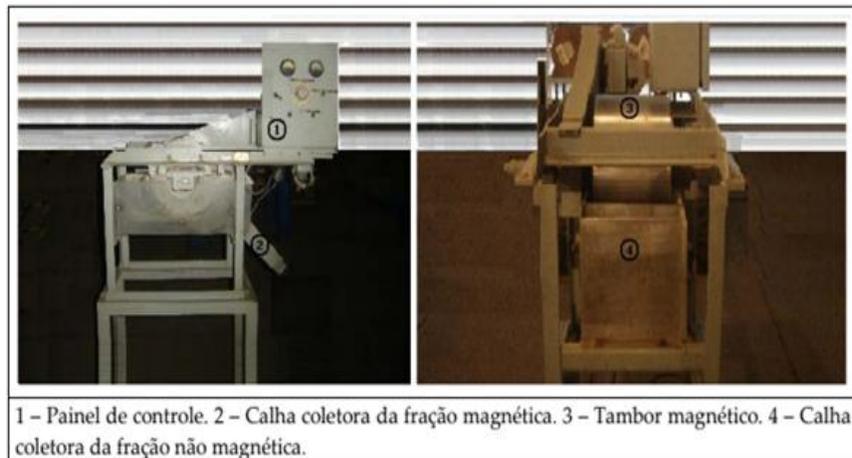


Figura 2.14: Separador magnético a húmido de baixa intensidade. [Fonte: CETEM]

Separador magnético a húmido de alta intensidade (separador a húmido): possibilita o uso em minérios com granulometria que seja abaixo de $75\mu\text{m}$. Nesse aparelho, devido ao fato dos electroímãs produzirem um campo magnético com intensidade alta, é possível ter campos magnéticos elevados em que o minério irá passar e as partículas paramagnéticas serão retidas pela ação do campo.

Em função disso o equipamento é interessante por suas maiores vantagens em relação aos outros. Apesar da capacidade de tratar pouco material, ainda é muito eficiente, versátil e prático, que oferece bons resultados e com baixo custo.



Figura 2.15: Separador magnético a húmido de alta intensidade. [Fonte: CETEM]

2.6.2 Beneficiamento do Nióbio do ponto de vista técnico e económico

1. Ponto de vista Técnico

Após o minério ser extraído da mina, os blocos são encaminhados ao britador para que sejam reduzidos a uma granulometria conveniente para alimentação dos moinhos ou para sua utilização directa.

Genericamente, britagem pode ser definida como um conjunto de operações unitárias que objetiva a fragmentação de blocos de minérios oriundos de uma mina ou de blocos de rochas de uma pedreira, levando-os à granulometria adequada para utilização directa ou para posterior processamento. A britagem é um estágio no processamento de minérios que utiliza, em sucessivas etapas, equipamentos apropriados para a redução de tamanhos convenientes.

Posteriormente o minério é retirado destes silos, por meio de alimentadores de placas, e descarregado em uma correia transportadora que alimenta um moinho de bolas.

Os cristais de nióbio são bastante pequenos, exigem uma moagem relativamente fina para obter a sua liberação, a fim de alimentar a flutuação. Em geral, o tratamento do minério se processa com as seguintes fases: Britagem, Moagem (moinho de bolas), Separação Magnética, Deslamagem e Flutuação.

2.7 Utilização do mineral nióbio

O mineral apresenta uma grande aplicabilidade no nosso quotidiano. E os produtos mais comercializados de nióbio são:

- ✓ **Concentrados de Nióbio:** uma base que contém 58% de Nb_2O_5 .
- ✓ **Liga de ferro-Nióbio:** contém 65% de nióbio.
- ✓ **Óxido de nióbio de alta pureza:** utilizado na produção de materiais especiais.

2.7.1 Liga metálica

A adição de Nióbio a uma liga aumenta a sua temperabilidade, ou seja, a capacidade de endurecer quando exposta ao calor e depois arrefecida. Com isso, o material que contém nióbio pode ser submetido a tratamentos térmicos específicos.

Esses efeitos são benéficos pois podem ampliar as aplicações industriais de uma liga.

O aço, por exemplo, é uma liga metálica formada por ferro e carbono. A adição de nióbio a essa liga pode trazer vantagens para:

- ❖ **Indústria automóvel:** produção de um carro mais leve e mais resistente à colisão.
- ❖ **Construção civil:** melhora a soldabilidade do aço e confere maleabilidade.
- ❖ **Indústria de condutas de transportes:** permite construções com paredes mais finas e diâmetros maiores, sem afetar a segurança.

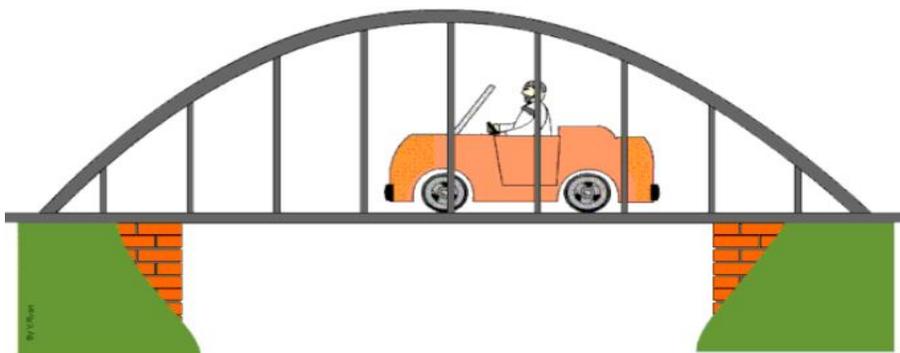


Figura 2.16:Liga Metálica. [Fonte:BNDES]

2.7.2 Superliga

A superliga é uma liga metálica com alta resistência a elevadas temperaturas e resistência mecânica. Ligas contendo nióbio fazem com que esse material seja útil na fabricação de turbinas de aviões ou de produção de energia.

A vantagem de operar em elevadas temperaturas faz com que as superligas componham motores a jacto de alto desempenho.

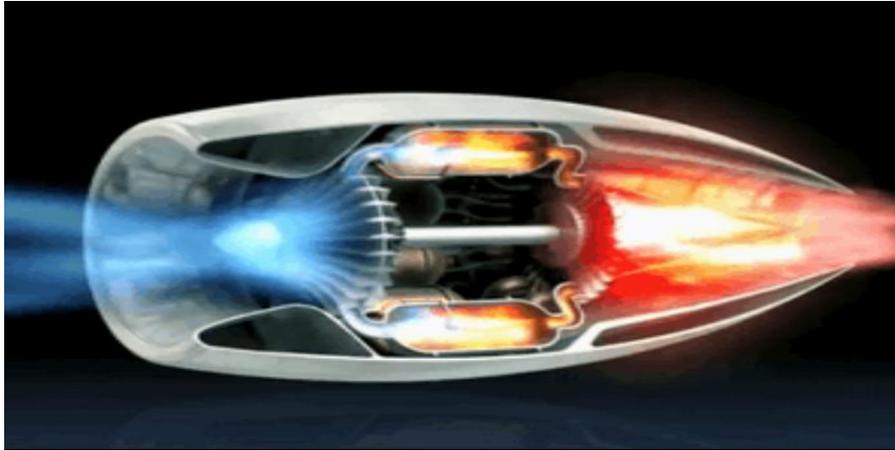


Figura 2.17:Turbina de um Avião. [Fonte: BNDES]

2.7.3 Ímãs Supercondutores

A supercondutividade do nióbio faz com os compostos de nióbio-germânio, nióbio-escândio e nióbio-titânio sejam utilizados em:

- Scanner das máquinas de ressonância magnética.
- Aceleradores de partículas, como o Grande Colisor de Hádrons.
- Detecção de radiação eletromagnética e estudo da radiação cósmica por materiais que contém nitrito de nióbio.

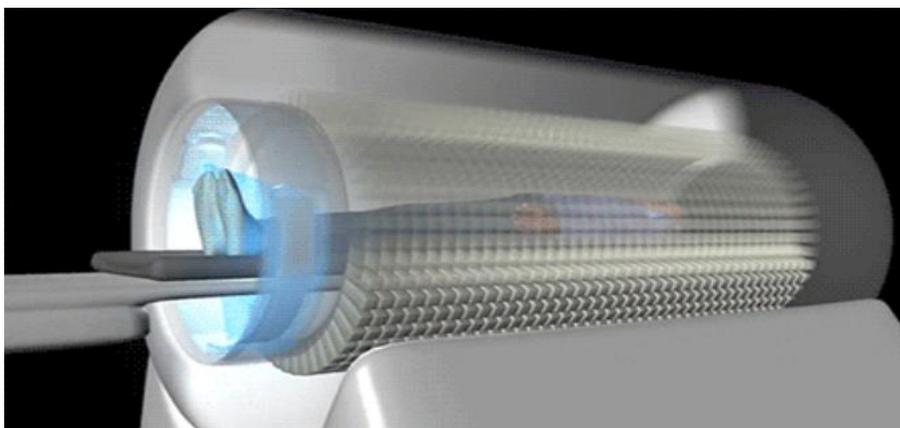


Figura 2.18:Máquina de ressonância magnética. [Fonte: BNDES]

CAPÍTULO III – DESENVOLVIMENTO

3.1 Estudo de Caso

O minério de Bonga (Niobonga) encontra-se na localidade de Bonga, no município de Quilengues, província da Huíla. A sua concessão é extensiva com cerca de 443,53 quilómetros quadrados, com reservas provadas (14 milhões de toneladas de Nb_2O_5 e 8 milhões de toneladas de P_2O_5).

3.1.1 Caracterização do minério de Bonga

3.1.1.1 Características geológicas e mineralógicas do nióbio de Bonga

O minério é secundário e resultante de um processo de meteorização. A tabela abaixo apresenta a sua composição mineralógica.

Tabela 3.1: Características mineralógicas do nióbio de Bonga.

Minerais	% Nb_2O_5	% Fe	% P_2O_5	Densidade Relativa (g/cm^3)
Pirocloro	61,75			4,3
Monazite			33,43	4,9
Magnetite	0,094	63,34	0,30	5,17
Hematite	0,36	57,67	0,23	5,2
Apatite	0,12		40,81	3,2
Limonite	0,28	47,98	3,39	2,7

[Fonte: Sine nomine]

Os principais minerais de ganga são, para além da limonite, a argila, os feldspatos, os quartzos, as micas, a calcite, etc.

1.1.1.2 Características químicas do nióbio de Bonga

Tabela 3.2: Características químicas do nióbio de Bonga.

Compostos	Teor, %
Nb ₂ O ₅	0,758
Fe	12,30
P ₂ O ₅	7,23
S	< 0,05
TiO ₂	1,33
Mn	1,40
Ta ₂ O ₅	0,014
SiO ₂	43,57
CaO	9,63
MgO	0,76
Al ₂ O ₃	8,96
REO	0,28
WO ₃	0,03
Perda de Ignição	5,20

[Fonte: Sine nomine]

3.1.1.3 Características granulométricas dos principais minerais

Todos os minerais principais apresentam uma dimensão máxima de ocorrência abaixo de 0,2 mm. Todos os minerais principais apresentam uma ocorrência considerável entre 0,16 e 0,04 mm. À exceção do rútilo, de ferro-nióbio, a ocorrência abaixo de 0,04 mm reduz-se consideravelmente.

Tabela 3.3:Características granulométrico-químicas.

Intervalo granulométrico	Peso %	Nb ₂ O ₅ , %
+ 74 μm	54,62	0,86
- 74 + 43 μm	10,06	1,03
- 43 + 2 μm	11,53	0,93
- 2 + 1 μm	6,23	0,50
- 1 μm	17,56	0,26

[Fonte:Sine nomine]

3.1.2 Densidade do sólido.

O cálculo da densidade do sólido ou densidade do minério foi feito com base na fórmula (3.1), para isso foram necessárias a massa em peso e a densidade relativa de cada mineral, indicados na Tabela 3.1.

A densidade do minério é calculada abaixo:

$x_i = \% \text{ em peso do mineral}$

$d_i = \text{densidade relativa do mineral}$

$\delta_s = \text{densidade do sólido}$

$$\delta_s = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_i}} \times 100\% \quad (3.1)$$

$$\delta_s = 2 \text{ t/m}^3$$

3.1.3 Localização geográfica

A localidade de Bonga está situada no município de Quilengues, Província da Huíla. A fig. (3.1) mostra mais detalhes.

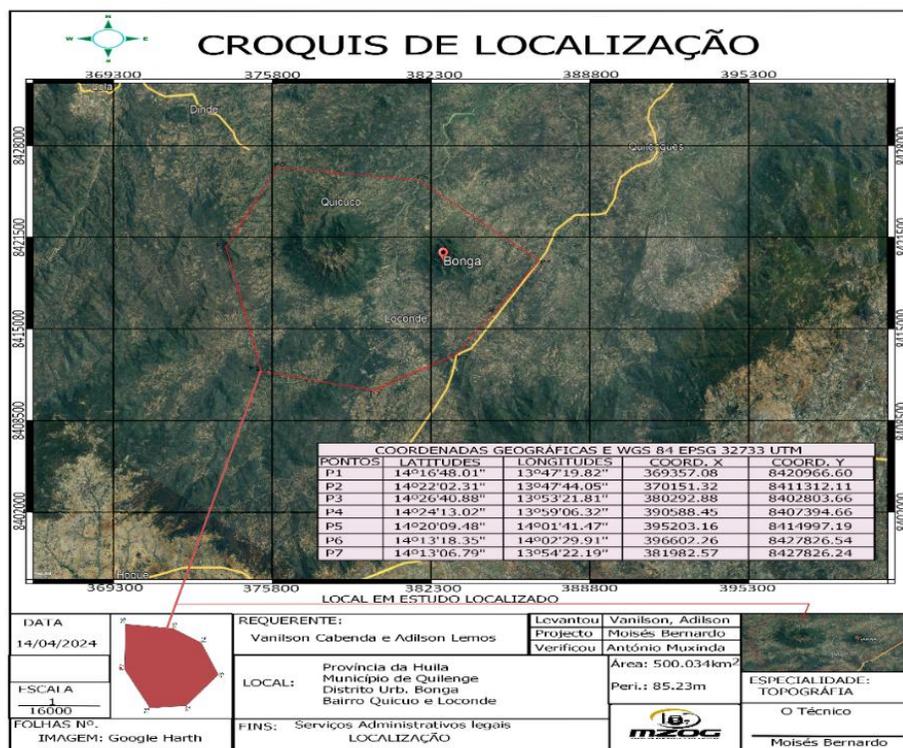


Figura 3.1: Croquis de Localização [Fonte: Os Autores]

3.2 Análise granulométrica por crivagem a húmido da amostra do minério tal qual (Nióbio de Bonga – Huíla)

A amostra de Nióbio de Bonga no seu todo, apresentou um peso de 3,180kg, e posteriormente foi submetida um processo de quartação, para obtenção da amostra para a análise por crivagem a húmido. A análise por crivagem a húmido foi feita no Laboratório de Preparação de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade Agostinho Neto.



Figura 3.2:Nióbio de Bonga. [Fonte:Sine nomine]

3.2.1. Pesagem da Amostra inicial

Um quarto da amostra inicial foi usado para a AG por crivagem, tendo sido pesada numa balança **Explor Pro**, tendo-se registado um peso de 791,2 g.



Figura 3.3:Peso de $\frac{1}{4}$ da amostra usando a balança Explor Pro. [Fonte: Os Autores]

3.2.2. Análise Granulométrica por Crivagem a húmido do nióbio

No processo de análise granulométrica por crivagem a húmido, usamos os seguintes materiais: Alguidares, Crivos, Água, Borrifadores, Espátula, Cadinhos, Pincel, Estufa, Balança.

Usamos uma série de crivos (vide na figura 3.3) com as seguintes dimensões: 2mm; 0,83mm; 0,70mm; 0,41mm; 250 μ m; 150 μ m; 74 μ m; 45 μ m; 30 μ m e 20 μ m.



Figura 3.4:Série de crivos usados no processo de análise granulométrica por crivagem à húmido.

[Fonte: Os Autores]

O procedimento usado foi o que a literatura recomenda, e já referido no ponto 2.5.1.2.1 do qual se obtiveram 11 classes granulométricas.

As figuras 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, ilustram alguns passos da análise granulométrica por crivagem a húmido.



Figura 3.5:Ensaio experimental da análise granulométrica de crivagem a húmido.

[Fonte: Os Autores]



Figura 3.6:Amostra de nióbio após a secagem. [Fonte: Os Autores]

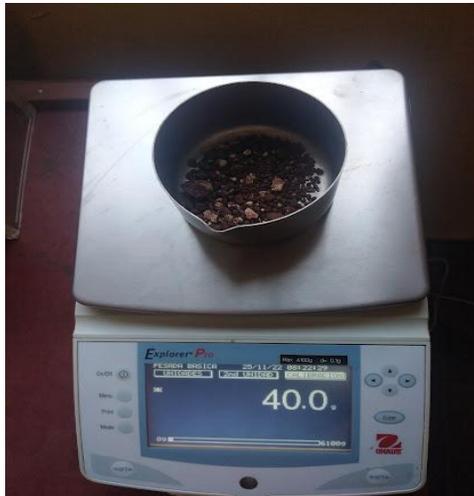


Figura 3.7: Pesagem da amostra de nióbio após a análise granulométrica por crivagem.

[Fonte: Os Autores]



Figura 3.8: Classes granulométricas obtidas e acondicionadas em saquetas.

[Fonte: Os Autores]

3.2.3. Resultados da Análise Granulométrica por Crivagem a húmido do nióbio

A tabela seguinte apresenta os resultados da análise granulométrica a húmido, o fraccionamento granulométrico obtido e as proporções relativas de cada classe granulométrica em relação ao total da amostra.

Tabela 3.4: Representação dos pesos após a secagem. [Fonte: O Autor]

Crivo	Peso (g)
+2mm	40
+0,83mm	61,4
+0,70mm	9,8
+0,41mm	47,3
+250 µm	88,3
+150 µm	75,2
+75 µm	111,6
+45 µm	75,2
+30 µm	44,3
+20 µm	46,6
Cego	139,3
Total	739

[Fonte: Os Autores]

A Tabela 3.5 - Massa por cada intervalo granulométrico, foi construída para possibilitar o traçado da curva granulométrica representada na Figura 3.8 - Curva Granulométrica.

Tabela 3.5: Massa por cada intervalo granulométrico.

Intervalos Granulométricos (µm)	Massa Retida (g)	Massa Retida (%)	Acumulados	
			% Peso retido	% Peso Passante
+2000	40	5,41	5,41	94,59
- 20000 + 830	61,4	8,31	13,72	86,28
- 830 + 700	9,8	1,33	15,05	84,95
- 700 + 410	47,3	6,4	21,45	78,55
- 410 + 250	88,3	11,95	33,4	66,60
- 250 + 150	75,2	10,18	43,57	56,43
- 150 + 75	111,6	15,1	58,67	41,33
- 75 + 45	75,2	10,18	68,85	31,15
- 45 + 30	44,3	5,99	74,84	25,16

- 30 + 20	46,6	6,31	81,15	18,85
- 20	139,3	18,85	100	0,00
Total	739	100		

[Fonte: Os Autores]

Os cálculos das massas retidas %, foram realizados mediante a fórmula:

$$\%MR_i = \frac{M_i \times 100\%}{MT} \quad (3.1)$$

Onde:

$\%MR_i$ – Percentagem da massa retida em cada intervalo

M_i – Massa retida de cada intervalo em grama

MT – Massa retida total em grama

$$\%MR_1 = \frac{M_1 \times 100\%}{MT}$$

Os cálculos das massas acumuladas retidas %, foram realizados mediante a formula:

$$\%PR_1 = \%MR_1$$

$$\%PR_{i+1} = \%PR_i + \%MR_{i+1} \quad (3.2)$$

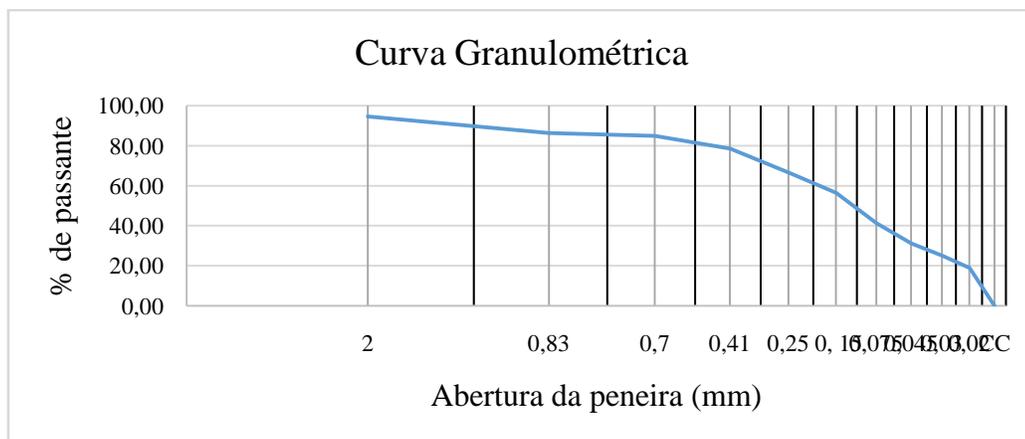


Figura 3.9: Curva Granulométrica. [Fonte: Os Autores]

3.3 Análise química do Nióbio de Bonga

O processo de análise química da amostra de NioBonga, foi realizado no laboratório da GEOANGOL, e foram feitas análises qualitativas e quantitativas.

Para determinar a composição dos minerais, identificar os elementos químicos presentes nas amostras, assim como estabelecer a proporção de cada elemento, utilizou-se a técnica de espectrometria de fluorescência de raio-X, ou seja, o método XRF juntamente com o ensaio de perda ao fogo, denominada, método de LOI, tornando preciso os resultados deste processo, pois que os LOIs representam as massas das substâncias orgânicas e voláteis que estavam presentes na amostra (perdas de ignição). Neste estudo foram usados os seguintes equipamentos:

- Balança Metler Toledo ML-204;
- Forno de LOI, a uma temperatura $1000\pm 5^{\circ}\text{C}$;
- Espectrômetro de Raio-X, S-8 Tier, Bruker

Como resultados tivemos a representação dos LOIs, das partes mineralógicas da nossa amostra, assim como os seus traços, acompanhados com os teores em cada classe. Relativamente ao nosso objetivo de estudo, apresentaremos abaixo os resultados dos principais minerais identificados, tal como: Óxido de Nióbio, Pentóxido de Fosforo e o Ferro.

Tabela 3.6: Teor dos elementos de interesse.

Intervalos Granulométricos			
(μm)	Nb_2O_5 (%)	P_2O_5 (%)	Fe (%)
+2000	0,410	0,065	40,561
- 20000 + 830	0,941	0,092	31,1122
- 830 + 700	1,460	0,077	27,466
- 700 + 410	2,020	0,081	28,401
- 410 + 250	2,430	0,112	25,170
- 250 + 150	2,060	19,500	13,084
- 150 + 75	2,530	15,700	1,437
- 75 + 45	2,550	14,300	13,084

- 45 + 30	1,260	0,092	31,122
- 30 + 20	1,040	0,078	24,320
- 20	0,726	0,060	30,017

[Fonte:Compilação da informação prestada pela GEOANGOL]

3.4 Identificação das faixas granulométricas de interesse do minério de Nióbio de Bonga

Mediante as características granulométricas-químicas dos principais minerais, os minerais de interesse apresentam-se numa dimensão de ocorrência abaixo de 200µm, na qual, de forma considerável encontram-se entre 160 e 40µm. Relativamente às disponibilidades de crivos, no processo de análise granulométrica por crivagem que foi realizado, foram substituídos alguns crivos, usando os de dimensões próximas aos das dimensões iniciais. Abaixo temos uma tabela que representa os intervalos de dados iniciais (tabela 3.3: características granulométrica-químicas do nióbio de Bonga), e os dados experimentais (características granulométricas-químicas vindo do laboratório da FE-UAN).

Tabela 3.7:Dados comparativos.

Dados Iniciais			Dados Experimentais		
Intervalos Granulométricos (µm)	% Peso	% Nb ₂ O ₅	Intervalos Granulométricos (µm)	% Peso	% Nb ₂ O ₅
- 74 + 43	10,06	1,03	- 75 + 45	10,18	2,55
- 43 + 20	11,53	0,93	- 45 + 20	12,3	1,15
- 20	23,79	0,32	- 20	18,85	0,72
			- 250 + 20	47,76	2,08

[Fonte:Os Autores]

Os cálculos dos pesos experimentais e os teores, foram realizados mediante as seguintes fórmulas:

$$\sum \%R = \%R_i + \%R_{i+1}$$

$$\%Teor = \frac{\sum UM}{\sum \%R} (3.3)$$

Onde:

$\Sigma \%R$: % total de retido no intervalo de retido

$\%R_i$: % de retido em cada classe

$\%Teor$: teor de alimentação em um intervalo de classe

ΣUM : % total de unidade metalúrgica num intervalo de classe.

A Tabela a seguir, representa os intervalos de classes de interesse tendo em conta as características iniciais, as características experimentais e os teores altos dos elementos de interesse.

Tabela 3.8: Identificação das faixas granulométricas de interesse.

Intervalos Granulométricos (μm)	Teor		Teor
	Nb_2O_5 (%)	P_2O_5 (%)	Fe Total (%)
+2000	0,410	0,065	40,561
- 20000 + 830	0,941	0,092	31,1122
- 830 + 700	1,460	0,077	27,466
- 700 + 410	2,020	0,081	28,401
- 410 + 250	2,430	0,112	25,170
- 250 + 150	2,060	19,500	13,084
- 150 + 75	2,530	15,700	1,437
- 75 + 45	2,550	14,300	13,084
- 45 + 30	1,260	0,092	31,122
- 30 + 20	1,040	0,078	24,320
- 20	0,726	0,060	30,017

[Fonte: Compilação da informação prestada pela GEOANGOL]

Desta feita, identificamos que **as faixas de interesse estão no intervalo – 250 μm + 20 μm** , para o nióbio, o fósforo e o ferro, pois que apresentam maiores teores (classes mais ricas) nos minerais susceptíveis de serem recuperados.

3.5 Determinação da percentagem de mineral útil nas faixas finas primárias do Nióbio de Bonga

Para determinar as percentagens do mineral útil nas fracções finas de interesse, foi realizado o balanço metalúrgico nessas fracções, tendo em conta os teores dos minerais de interesse em cada fracção e as suas massas.

Tabela 3.9: Cálculo das unidades metalúrgicas dos minerais nas faixas finas primárias.

Intervalos Granulométricos (μm)	UM	UM	UM
	Nb ₂ O ₅	P ₂ O ₅	Fe
+2000	0,410	0,352	219,43
- 20000 + 830	0,941	0,765	258,542
- 830 + 700	1,460	0,102	36,529
- 700 + 410	2,020	0,518	181,766
- 410 + 250	2,430	1,338	300,781
- 250 + 150	2,060	198,51	133,195
- 150 + 75	2,530	237,07	21,698
- 75 + 45	2,550	145,574	133,195
- 45 + 30	1,260	0,551	186,420
- 30 + 20	1,040	0,492	458,432
- 20	0,726	1,031	565,820

[Fonte: Os Autores]

Para o cálculo das Unidades de metal usamos a fórmula: $UM = \text{teor} \times \% \text{ Retido}$ (3.3)

Onde:

UM: Unidade Metálica;

Teor: Teor de cada elemento por intervalo de classe.

% Retido: Percentagem de retidos em cada intervalo de classe.

3.6 Características da alimentação à concentração

A concentração de minerais é um processo crucial na mineração e no tratamento de minérios, e a alimentação para esses processos de concentração possuem características específicas que ditam o curso do processo, a eficiência e o resultado que se deseja alcançar. Apresentaremos abaixo as principais características da alimentação à concentração do minério de NioBonga.

Tabela 3.10: Características da alimentação à concentração

Alimentação	Teores	Peso
% Nb ₂ O ₅	0,758	3,73
% P ₂ O ₅	7,23	35,63
% Fe	12,30	60,62

[Fonte: Os Autores]

Para o cálculo dos pesos usamos a fórmula: $Peso = \frac{\text{teor do mineral}}{\sum \text{teores de todos minerais}}$ (3.4)

O minério e o estéril são friáveis (não consolidados) e é proposta uma exploração à céu aberto com a produção de 1000 t/d num sistema de 300 dias/ano de trabalho, com uma densidade média de 2t/m³ num teor médio do corpo (Nb₂O₅) de 0,58%.

A libertação óptima é alcançada à malha de moagem $d_{95} = 100$ mesh

Por falta de experimentos laboratoriais, as características, foram calculadas mediante alguns valores estimados.

3.7 Características dos Circuitos de flutuação

1. Cálculo do tempo óptimo no banco

$$k = \frac{-\sum_{i=1}^n Y_{abs} * t}{\sum_{i=1}^n t^2} \quad (3.5)$$

Estimando $k_{Nb_{2}O_{5}} = 0,5 \text{ mim}^{-1}$ e $k_{P_{2}O_{5}} = 0,008 \text{ mim}^{-1}$

$$t_{opt} = \frac{\ln C_2 - \ln C_1}{k_{P_2O_5} - k_{Nb_2O_5}} \quad (3.6)$$

onde: $C_1 = R_{lim}^{Nb_2O_5} * k^{Nb_2O_5}$ e $C_2 = R_{lim}^{P_2O_5} * k^{P_2O_5}$

Estimando recuperação limite em 0,97 para Nb_2O_5 e 1,00 para P_2O_5 .

$$C_1 = 0,97 * 0,5C_2 = 1,00 * 0,008$$

$$C_1 = 0,485C_2 = 0,008$$

$$t_{opt} = \frac{\ln(C_2) - \ln(C_1)}{C_2 - C_1} \quad (3.7)$$

$$t_{opt} = 8,28 \text{ min}$$

2. Cálculo do tempo de residência

$$\tau = \frac{t_{opt}}{N^{\circ} \text{ células}} \quad (3.8)$$

Considerando 8 células, teremos o tempo de residência na célula:

$$\tau = 1,035 \text{ min}$$

3. Cálculos das recuperações nas células e nos bancos nos circuitos

P/8 células

$$R_{Nb_2O_5}^i = \frac{k_{Nb_2O_5} * \tau}{1 + k_{Nb_2O_5} * \tau} * 100\% \quad (3.9)$$

$$R_{Nb_2O_5}^i = 34,10\%$$

$$R_{P_2O_5}^i = \frac{k_{P_2O_5} * \tau}{1 + k_{P_2O_5} * \tau} * 100\% \quad (3.10)$$

$$R_{P_2O_5}^i = 0,821\%$$

Circuito do Nióbio

$$R_{\text{banco}}^{Nb_2O_5} = 1 - (1 - R_{Nb_2O_5}^i)^n \quad (3.11)$$

$$R_{\text{banco}}^{Nb_2O_5} = 66,7\%$$

Circuito do Fosforo

$$R_{\text{banco}}^{P_2O_5} = 1 - (1 - R_{P_2O_5}^i)^n \quad (3.12)$$

$$R_{\text{banco}}^{P_2O_5} = 74,71\%$$

4. Cálculo do rendimento em peso

P/8 células

$$R_P = a_{Nb_2O_5} * R_{\text{lim}}^{Nb_2O_5} * R_{\text{banco}}^{Nb_2O_5} + a_{P_2O_5} * R_{\text{lim}}^{P_2O_5} * R_{\text{banco}}^{P_2O_5} \quad (3.13)$$

Circuito do Nióbio

$$R_{P-Nb_2O_5} = 2,74\%$$

Circuito do Fosforo

$$R_{-P-P_2O_5} = 17,81\%$$

5. Cálculos dos Teores

Nb₂O₅

$$Teor_{Nb_2O_5} = \frac{a_{Nb_2O_5} * R_{\text{lim}}^{Nb_2O_5} * R_{\text{banco}}^{Nb_2O_5}}{R_{P-e.u}} \quad (3.14)$$

P/8 células

$$Teor_{Nb_2O_5} = 57,52\%$$



$$Teor_{P_2O_5} = \frac{a_{P_2O_5} * R_{lim}^{P_2O_5} * R_{banco}^{P_2O_5}}{R_{P_2O_5}}$$

$$Teor_{P_2O_5} = 63,30\%$$

6. Cálculos da capacidade horária

Sabendo que a produção é de 1000t/dia, e o trabalho funcionará em 300 dias/ano, teremos:

$$C_h = 1000t/24h$$

$$C_h = 41,7 t/h$$

7. Cálculos dos volumes

Sabendo que $\delta_m = 2 t/m^3$, então a capacidade em volume fica:

$$C_v = \frac{C_h}{\delta_m} \quad (3.15)$$

$$C_v = 20,8m^3/h$$

Contendo 25% de sólido e 75% de água, então temos:

$$V_p = 104m^3/h$$

Considerando o ar de borbulhamento de 15% ocupado, e o factor de segurança de 2, teremos:

$$V_T = 119,6m^3/h$$

Sabendo que o $t_{opt} = 8,28min = 0,13h$. Logo o volume total das células fica:

$$V_{T/C} = 31m^3$$

3.7 Fluxograma Proposto para a recuperação do Nióbio e do Fósforo por flutuação

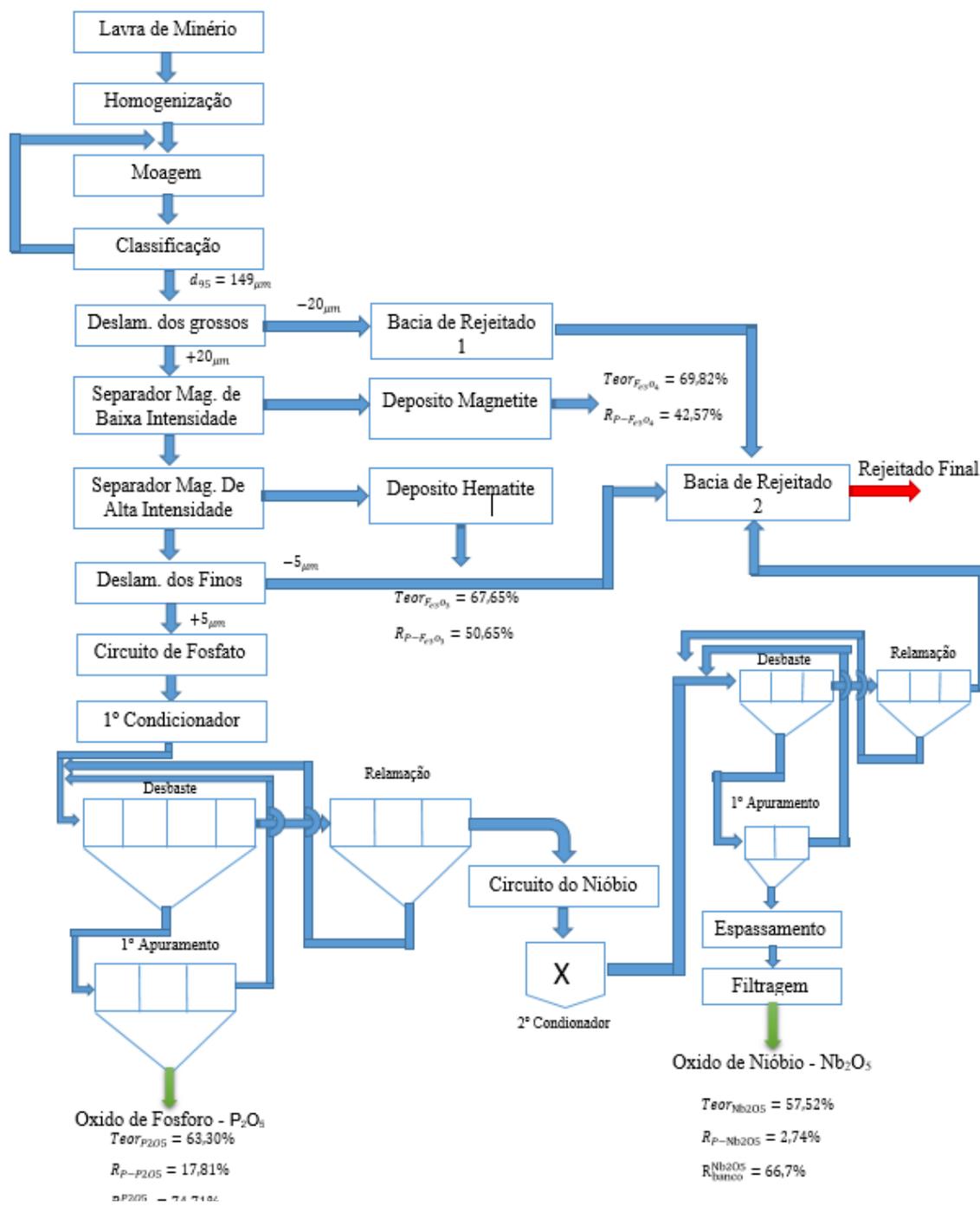


Figura 3.10: Fluxograma de flutuação para concentração de nióbio e de fósforo.

[Fonte: Os Autores]

Lavra de minério – O minério de Nióbio de Bonga, é de origem secundária, resultante de fenómenos de meteorização à superfície terrestre, sendo por isso não consolidado, isto é, friável, desta feita não há necessidade de detonação. É feito o desmonte e transportado.

Homogeneização – O minério é transportado até ao Pátio de Homogeneização, e é usado a técnica de empilhamento Chevron para o processo de homogeneização. Devido a sua formação geológica, aparece um minério um pouco diferente nas zonas de formações, e é notório pela sua coloração, desta feita, para trabalhar com esse minério ele precisa estar mais uniforme. Por esse motivo, faz-se a homogeneização.

Moagem – O minério é misturado com água de modo a criar uma polpa. Após isso, ele deve ser moído para facilitar a libertação do pirocloro. Os minerais de interesse são encontrados nos finos. Para esse processo deverá ser usado o moinho de bolas. Quanto ao calibrador, será usado o classificador espiral em que a libertação óptima é alcançada à malha de moagem $d_{95} = 100 \text{ mesh}$ (149 μm).

Deslamagem – A própria natureza do minério laterítico implica a existência de quantidades consideráveis de lamas finas primárias, para além de lamas secundárias que são formadas no circuito de moagem. Após a moagem, devido à redução granulométrica do material, ocorre uma grande geração de finos. Estes finos contribuem numa separação magnética não eficiente, e por recobrirem as superfícies das partículas minerais, impedem também que os reagentes exerçam suas funções de maneira eficiente e prejudicam a etapa de flutuação. Então, é necessária a realização da deslamagem, visando obter bons resultados, o que significa eliminar as fracções de sólido mais finas (extrafinos). O processo de deslamagem deverá ser realizado em 2 estágios, isto é, deslamagem dos grossos (realizado antes da separação magnética), deslamagem dos finos (realizado antes do circuito de fosfato). Cada estágio constituído por duas fases (ciclonagem e reciclonagem), de forma a reduzir ao máximo a presença de partículas finas no produto que posteriormente servirá para alimentar o processo de flutuação.

Separação Magnética – O Pirocloro está associado a outros minerais como a Magnetite e a Hematite (minerais com alto teor de ferro). Utilizaremos a separação magnética para separar esses minerais do pirocloro. Esse processo será feito por um separador de rolo de

baixa intensidade, para separar a Magnetite, e um separador de rolo de alta intensidade, para separar a Hematite.

Flutuação – O processo de flutuação segue a deslamagem, devendo inicialmente a polpa ser condicionada em tanques misturadores denominados condicionadores. No esquema geral é representado dois circuitos de recuperação em que cada um deles está acompanhado com um tanque condicionado, onde se adicionam os reagentes químicos. O primeiro é o **circuito de fosfato**, começando pela preparação das partículas na adsorção de reagentes colectores e depressores como o **hidrocol** e o **Ácido fluorídrico** (funcionando também como regulador de pH), nas superfícies dos óxidos de fósforo, e de outros reagentes, servindo como alimentação do primeiro estágio de recuperação (desengrossamento), para concentração desses mesmos óxidos. Este estágio de recuperação dará dois produtos em que as partículas hidrofóbicas que constituem o fosfato serão apuradas e dadas como concentrado final de **óxido de fósforo**, ao passo que às partículas hidrofílicas que foram deprimidas irão alimentar o segundo condicionador, onde se adicionarão reagentes químicos para a sua activação a fim de flutuar o pirocloro.

A este segundo tanque condicionador são misturados os reagentes químicos, tais como o **ácido graxo** e o **ácido hexofluorissífico**. Servindo um como colector e outro como activante do pirocloro e, conseqüentemente depressor do **óxido de silício**. Temos também os reagentes como **cianeto de fósforo** e o **ácido fosfórico** que servirão como depressores da limonita e outros óxidos não metálicos (Al_2O_3 , P_2O_5), presentes no minério em causa. Servirão também de reagentes modificadores de pH, reactivamente ao ambiente alcalino que vai criar-se para a concentração do pirocloro. Foram usados também os reagentes espumantes denominados **óleo de pinho** durante o processo todo (nos bancos), nos dois circuitos.

Após serem realizadas as misturas, teremos às partículas devidamente preparadas, seguindo para alimentação do segundo estágio de recuperação, iniciando pelo desbaste (coluna de flutuação) do qual resultará uma massa como concentrado (partículas hidrofóbicas), indo para o primeiro apuramento, e outra massa como rejeitado (partículas hidrofílicas), alimentando o estágio de reclamação. Posteriormente, teremos como produto do apuramento óxido de Nióbio, conduzido para às máquinas de espessamento (lamelas),

seguido deste processo de filtração em filtros de discos, de modo a remover-se a maior percentagem de água contida no concentrado da flutuação (óxido de nióbio).

CAPITULO IV -CONCLUSÕES E SUGESTÕESPARA DESENVOLVIMENTOS ULTERIORES

4.1 Conclusões

O presente estudo visou contribuir para o cálculo das características metalúrgicas do concentrado por flutuação do minério de bonga, com foco específico no Nióbio e no fósforo. Ao longo da pesquisa, foram alcançados resultados que permitem uma melhor compreensão das propriedades do minério e das variáveis que afetam a eficiência do processo de flutuação. considerando os resultados obtidos no processo da análise granulométrica realizada no Laboratório de Tratamento de Minérios da Faculdade de Engenharia da Universidade Agostinho Neto, e os resultados da análise química realizados no Laboratório da GEOANGOL, permitiu-nos obter informações dos teores dos elementos de interesse em cada intervalo granulométrico.

Foi possível identificar as faixas granulométricas de interesse no minério de Nióbio de Bonga, em classes de (-250 μm à +20 μm), destacando a importância do controle adequado da granulometria para otimizar a recuperação mineral. As análises indicaram que as frações finas primárias possuem uma percentagem significativa do mineral útil, o que reforça a necessidade de técnicas eficientes de concentração para maximizar o aproveitamento desses minerais nas operações futuras.

Por fim, a proposta de flutuação apresentada para a concentração de Nióbio e fósforo mostrou-se viável, com potencial para ser implementada em escala industrial. Um dos diferenciais deste trabalho foi a utilização do objecto de pesquisa, uma amostra de Nióbio, para a obtenção de resultados experimentais que contribuíssem para na obtenção de informações a serem utilizadas na concentração do Nióbio e o Fósforo. O estudo demonstrou que, ao otimizar o uso de reagentes e controlar rigorosamente os parâmetros do processo, é possível obter um concentrado de alta qualidade, maximizando a recuperação destes minerais.

Portanto, as contribuições desta pesquisa proporcionam não apenas um melhor entendimento das características metalúrgicas do minério de bonga, mas também oferecem diretrizes valiosas para futuras operações de beneficiamento, visando a maior eficiência e sustentabilidade no processamento desse importante recurso mineral que é o Nióbio.

4.2 Sugestões para Desenvolvimentos Ulteriores

Como sugestões, temos:

1. Realização de experimentos laboratórios a fim de:
 - a) Avaliar e dosear os reagentes propostos;
 - b) Identificar os tempos cumulativos para cada intervalo de recuperação, facilitando no cálculo do tempo óptimo para quantificação do desempenho do processo de flutuação.
2. Escolha do melhor esquema de deslamagem para o minério de NioBonga.
3. Estudo dos impactos ambientais durante o processo de beneficiamento do NioBonga
4. Estudo de viabilidade econômica para implementação do fluxograma de flutuação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Arterburn, R.A. 1976. The sizing and selection of hydrocyclones.
2. Arthur Pinto Chaves e Colaboradores, 2002-Teoria e prática do tratamento de minérios-volume 1
3. Belyadi,H.,&Haghighat,A.(2021).MachineLearningGuideforOilandGasUsing.
4. Beraldo .L. J.1987_Moagem de minérios em moinho tubulares. São Paulo.
5. Chu, L. & Luo, Q. 1994. Hydrocyclone with high sharpness of separation. *Filtration & Separation*. (November):733–736.
6. Drzymala, J. 2007. Mineral processing, foundations of theory and practice of minerallurgy. Wroclaw, Poland.
7. Flintoff, B.C., Plitt, L.R. & Turak, A.A. 1987. Cyclone modelling: A review of present technology. *CIM Bulletin*. 80:39–50.
8. Gaudin, A.M. 1937. Principles of Mineral dressing. First ed. New York & London: McGraw-Hill Book Company Inc.
9. Gupta, A. & Yan, D.S. 2006. Mineral processing, design and operation. Perth, Australia.Elsevier Science.
10. KELLY, E. G. SPOTTISWOOD, D.J Introduction to mineral processing. New York: Wiley, 1982. 3. 4.
11. Kelly, E.G. & Spottiswood, D.J. 1982. Introduction to mineral processing. First ed. New York:Wiley.
12. Mainza, A.N. 2006. Contribution to the understanding of the three-product cyclone on classification of a dual density platinum ore. University of Cape Town.
13. O. de Souza Paraiso. Mining, ore preparation and Niobium-based materials production at araxá, Brazil.
14. Salvador L. M de Almeida e Sampaio A. J_ Tratamento de Minério. 4ªEdição/CETEM
15. R. O Burt.2000: Concentration of Tantalum and Niobium.

ANEXOS

ANEXO I

Instrumentos Utilizados durante análise granulométrica



Martelo de borracha



Lavagem do crivo usando um esguicho



Amostras na estufa

ANEXO II

Resultados das análises químicas realizados na GEOANGOL



Solicitação Nº: FT002/07/2023

Página 1 de 8

BOLETIM DE ANÁLISES LABORATORIAIS

Solicitação Nº: FT002/07/2023	
Cliente: FACULDADE DE ENGENHARIA-UAN	
Endereço:	Data de recepção das amostras: 11/12/2023
Telefone: +244 922059858	Data de análise: 20/12/2023
Email: cabenda1@hotmail.com	

Descrição e condição de amostra:	Rochas
Número de amostras:	Doze (12)
Parâmetro de análise:	<ul style="list-style-type: none">• Elementos Maiores por Ignição Florescência de RX (CHP007)• Análise de Perda na por Forno (CHP 001)
Método de preparação das amostras:	<ul style="list-style-type: none">• XRF-Mistura de 5g de amostra + 1g de cera prensada para um comprimido• LOI-Acenda 1 g da amostra e calcule a massa perdida na ignição.
Equipamentos usados:	<ul style="list-style-type: none">• Balança Metler Toledo ML-204,• Forno de LOI, Temperatura 1000±5°C• Espectrômetro de Raio-X, S-8 Tiger, Bruker
Método de amostragem:	<ul style="list-style-type: none">• Pelo cliente

Verificado Por: John. O. Bomani **Signatário Técnico (ST):**

Aprovado Por: Kakoma Mboko **Signatário Técnico (ST):**

Data: 20/12/2023

RESULTADOS ANALITICOS
**A. ANÁLISE DE ELEMENTOS MAIORES POR XRF
(Métodos acreditados)**

Nº	ID DE AMOSTRA	SiO ₂ %	UM ±	Al ₂ O ₃ %	UM ±	Fe ₂ O ₃ %	UM ±	CaO %	UM ±
01	+250 µm ¼	25,573	0,187	9,417	0,558	25,170	0,049	13,872	0,443
02	+0.70mm ¼	35,665	0,260	9,957	0,589	27,466	0,054	6,366	0,203
03	+0.41mm ¼	30,161	0,220	10,065	0,596	28,401	0,056	7,826	0,250
04	+30 µm	27,867	0,203	13,269	0,786	22,109	0,043	9,048	0,289
05	Under ¼	19,954	0,146	14,347	0,849	30,017	0,059	3,468	0,111
06	Over ¼	20,069	0,147	12,729	0,754	29,252	0,057	4,886	0,156
07	+0.83mm ¼	30,275	0,221	8,306	0,492	31,122	0,061	7,992	0,255
08	+75 µm ¼	21,761	0,159	7,605	0,456	14,437	0,028	26,019	0,830
09	+2mm ¼	29,587	0,216	5,167	0,306	40,561	0,080	6,408	0,204
10	+150 µm ou 0.15mm ¼	24,151	0,176	5,578	0,335	13,084	0,026	26,117	0,833
11	+20 µm ¼	26,491	0,193	13,916	0,824	24,320	0,048	5,921	0,189
12	+45 µm ¼	29,811	0,218	8,548	0,513	13,084	0,026	19,417	0,619

Nº	ID DE AMOSTRA	K ₂ O %	UM ±	MgO %	UM ±	MnO %	UM ±	P2O5 %	UM ±
01	+250 µm ¼	2,770	0,090	0,348	0,046	3,330	0,017	0,112	0,001
02	+0.70mm ¼	3,510	0,114	0,295	0,039	3,510	0,114	0,077	0,001
03	+0.41mm ¼	3,240	0,106	0,336	0,044	3,170	0,016	0,081	0,001
04	+30 µm	2,730	0,089	0,532	0,070	3,020	0,015	0,096	0,001
05	Under ¼	1,470	0,048	0,555	0,073	4,030	0,020	0,060	0,001
06	Over ¼	1,640	0,053	0,555	0,073	4,090	0,020	0,064	0,001
07	+0.83mm ¼	2,990	0,097	0,220	0,029	3,000	0,282	0,092	0,001
08	+75 µm ¼	1,785	0,058	0,255	0,033	2,080	0,010	15,700	0,149
09	+2mm ¼	1,830	0,060	0,274	0,036	2,190	0,011	0,065	0,001
10	+150 µm ou 0.15mm ¼	1,320	0,043	0,245	0,032	1,400	0,007	19,500	0,185
11	+20 µm ¼	2,370	0,077	0,683	0,089	3,390	0,017	0,078	0,001
12	+45 µm ¼	2,386	0,078	0,245	0,032	1,700	0,009	14,300	0,136

A Geoangol – Geologia e Sondagens, S.A (Laboratório) é um laboratório acreditado pela SADCAS e está em conformidade com os requisitos da NORMA ISO / IEC 17025:2017 para testes específicos, conforme indicado no escopo de acreditação do Laboratório- GEOANGOL, SA disponível no site dos Serviços de Acreditação da Comunidade de Desenvolvimento da África Austral - www.sadcas.com

GEOANGOL - Geologia e Sondagens, S.A
 Perímetro do Pólo de Desenvolvimento Industrial de
 Viana. Talhão nº 43B. Viana – Luanda. Telefones: +244
 226430165/166


TEST-5 0039

Nº	ID DE AMOSTRA	Gd2O3 %	UM ±	TiO2 %	UM ±	Cr ₂ O ₃ %	UM ±	CeO2 %	UM ±
01	+250 µm ¼	0,040	0,000	1,449	0,042	<0,001	0,000	0,007	0,000
02	+0.70mm ¼	0,000	0,000	1,449	0,042	<0,001	0,000	0,006	0,000
03	+0.41mm ¼	0,010	0,000	1,413	0,041	0,833	0,035	0,008	0,000
04	+30 µm	0,040	0,000	1,509	0,044	0,833	0,035	0,009	0,000
05	Under ¼	0,040	0,000	1,120	0,033	<0,001	0,000	0,011	0,000
06	Over ¼	0,040	0,000	1,099	0,032	3,333	0,138	0,011	0,000
07	+0.83mm ¼	<0,001	0,000	1,713	0,050	<0,001	0,000	0,436	0,000
08	+75 µm ¼	<0,001	0,000	0,706	0,021	<0,001	0,000	0,700	0,000
09	+2mm ¼	0,040	0,000	1,916	0,056	<0,001	0,000	0,002	0,000
10	+150 µm ou 0.15mm ¼	<0,001	0,000	0,483	0,014	<0,001	0,000	0,610	0,000
11	+20 µm ¼	0,040	0,000	1,365	0,040	<0,001	0,000	0,012	0,000
12	+45 µm ¼	<0,001	0,000	0,744	0,022	0,020	0,001	0,750	0,000

Nº	ID DE AMOSTRA	Nb2O5 %	UM ±	La2O3 %	UM ±	Nd2O3 %	UM ±	SO ₂ %	UM ±
01	+250 µm ¼	2,430	0,199	0,477	0,034	0,247	0,000	<0,001	0,000
02	+0.70mm ¼	1,460	0,120	0,285	0,020	0,261	0,000	1,367	0,062
03	+0.41mm ¼	2,020	0,166	0,410	0,029	0,187	0,000	<0,001	0,000
04	+30 µm	1,260	0,103	0,437	0,031	0,333	0,000	2,051	0,093
05	Under ¼	0,726	0,060	0,555	0,039	0,461	0,000	0,027	0,001
06	Over ¼	0,821	0,067	0,530	0,038	0,401	0,000	2,051	0,093
07	+0.83mm ¼	0,941	0,077	0,207	0,015	0,152	0,000	0,021	0,001
08	+75 µm ¼	2,530	0,207	0,450	0,000	0,280	0,000	<0,001	0,000
09	+2mm ¼	0,410	0,034	0,310	0,022	0,195	0,000	<0,001	0,000
10	+150 µm ou 0.15mm ¼	2,060	0,169	0,260	0,000	0,240	0,000	<0,001	0,000
11	+20 µm ¼	1,040	0,085	0,460	0,033	0,348	0,000	0,021	0,001
12	+45 µm ¼	2,550	0,209	0,320	0,000	0,330	0,000	0,003	0,000

A Geoangol - Geologia e Sondagens, S.A (Laboratório) é um laboratório acreditado pela SADCAS e está em conformidade com os requisitos da NORMA ISO / IEC 17025:2017 para testes específicos, conforme indicado no escopo de acreditação do Laboratório- GEOANGOL, SA disponível no site dos Serviços de Acreditação da Comunidade de Desenvolvimento da África Austral - www.sadcas.com

GEOANGOL - Geologia e Sondagens, S.A
Perímetro do Pólo de Desenvolvimento Industrial de
Viana. Talhão nº 43B. Viana - Luanda. Telefones: +244
226430165/166



TEST-5 0039

ANEXO III

Fórmulas e valores globais

Taxa de concentração do Nióbio

Varia entre 2,5% e 3%

Taxa de concentração do Fosforo

Varia entre 30% e 40%

Taxa de concentração da Magnetite

Varia entre 60% a 70%

Taxa de concentração da Hematite

Varia entre 50% a 68%

Os teores por concentrados do ferro, foram calculados mediante a seguinte fórmula:

$$\tau = \frac{c}{a} \times 100\%$$

Onde:

τ – Taxa de Concentração

c – Teor por concentrado

a – Teor da alimentação