



UFOP

Universidade Federal
de Ouro Preto



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO ESPORTE
Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM

**ENGENHARIA
MINERAL**



ALMA MATER IN
MINERALIA BRASILIENSIS

MICROFLOTAÇÃO DE HEMATITA E DOLOMITA COM CARBOXILATOS DE ORIGEM VEGETAL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Autora: Bruna de Oliveira Gomes

Orientador: Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz

Co-orientador: Dr. Felipe de Orquiza Milhomem

Ouro Preto

2022

Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral - PPGEM

Bruna de Oliveira Gomes

**FLOTAÇÃO DE HEMATITA E DOLOMITA COM CARBOXILATOS
DE ORIGEM VEGETAL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Tratamento de Minérios
Orientador: Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz
Co-orientador: Dr. Felipe de Orquiza Milhomem

**Ouro Preto
2022**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G633m Gomes, Bruna de Oliveira.

Microflotação de hematita e dolomita com carboxilatos de origem vegetal. [manuscrito] / Bruna de Oliveira Gomes. - 2022.

91 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. José Aurélio Medeiros Luz.

Coorientador: Prof. Dr. Felipe de Orquiza Milhomem.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral.

Área de Concentração: Tratamento de Minérios.

1. Flotação - Coletores. 2. Hematita. 3. Dolomita. 4. Óleos vegetais. I. Luz, José Aurélio Medeiros. II. Milhomem, Felipe de Orquiza. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 622.765.2

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Bruna de Oliveira Gomes

Microflotação de hematita e dolomita com carboxilatos de origem vegetal

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral

Aprovada em 22 de julho de 2022.

Membros da banca

Dr. José Aurélio Medeiros da Luz - Orientador — Universidade Federal de Ouro Preto — UFOP

Dr. Felipe de Orquiza Milhomem — Instituto Federal de Goiás — IFG

Dr. Marcus Alexandre Carvalho Winitkowski da Silveira — Secretaria Municipal de Meio Ambiente da Prefeitura de Belo Horizonte

José Aurélio Medeiros da Luz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 15/12/2022



Documento assinado eletronicamente por **Jose Aurelio Medeiros da Luz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/01/2023, às 23:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0454532** e o código CRC **81FA707E**.

“Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas. Isso é perfeitamente aceitável, elas são a abertura para achar as que estão certas.”

Carl Sagan

AGRADECIMENTOS

Dedico aos meus pais e irmãos, por sempre me lembrarem que são meu porto seguro, sendo um amparo durante toda minha trajetória.

Ao meu orientador, José Aurélio, por todo conhecimento e curiosidades compartilhados, paciência e principalmente confiança na minha capacidade desde a graduação. Este trabalho é mais um “result” da sua dedicação aos seus peixes.

Ao meu co-orientador Felipe Milhomem, pelo acompanhamento ao longo do processo, orientações e auxílio, tenho certeza de que será um excelente professor e orientador.

Ao membro da banca, Marcus Alexandre, por concordar em compor a banca e contribuir com considerações para melhora deste trabalho.

À aluna de iniciação científica, Fernanda Bento Sales, por auxiliar no desenvolvimento dos trabalhos dessa dissertação.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral (PPGEM), pela contribuição nos conhecimentos adquiridos.

Aos funcionários do DEMIN, Renata e Ludimilla, Flávio, Mariana, Vilma, Rita, Anderson, Rafael, Rodrigo e William por todo apoio e assistência prestados durante esse período.

Aos amigos do mestrado Warleson, Eduardo, Jorge, Paulo Victor, Amélia, Leandro e Letícia, pelas conversas, almoços e parcerias, essa jornada foi muito mais agradável com a presença de vocês.

Aos amigos da “casa verde”, pela amizade construída na convivência, foi um prazer inenarrável compartilhar a moradia com vocês.

Aos amigos “de fora” Aline, Pedro e Felipe, pela disponibilidade, compreensão e apoio.

À Universidade Federal de Ouro Preto, pela oportunidade de estudo.

Ao apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES). Agradeço ainda ao CNPq, FAPEMIG e Fundação Gorceix.

RESUMO

Os óleos vegetais apresentam propriedades naturais como baixa toxicidade tanto para o ambiente quanto para os humanos, são biodegradáveis e derivados de recursos renováveis. Sendo os coletores os principais insumos na flotação, os óleos vegetais já são amplamente empregados como coletores nesse processo, apresentando alto potencial como matéria-prima devido aos ácidos graxos constituintes. Este trabalho teve como objetivo avaliar, prospectivamente, o potencial de sabões de óleos, como os de semente de uva, de caroço de algodão e de crambe como coletores na flotação de minérios dolomíticos, usando o oleato de sódio como referência. Os ensaios de microflotação foram realizados com hematita e dolomita na célula de Fuerstenau e separado em três etapas principais. A primeira etapa foi realizada apenas com coletor e sistema isolado, nos pH 5; 6,1; 7,2. 8,3 e 9,4 e concentração de 50 mg/L. Na segunda etapa os ensaios foram realizados com mistura sintética igualitária dos minerais, na mesma faixa de pH utilizada anteriormente e com concentração dos coletores de 20 mg/L. Já a terceira etapa foi realizada com mistura binária dos minerais, nos pH 6,1; 8,3; 9,4 e 10,5, com adição de depressor com concentração de 3 mg/L e coletor com 50 mg/L. No sistema isolado, a melhor flotabilidade para a hematita foi no pH 8,3, com 87,02 % para o ácido oleico e 83,02 % para o óleo de semente de uva. Para a dolomita, todos os óleos resultaram em alta flotabilidade em todos os valores de pH estudados. Com a mistura binária e sem depressor, o óleo de crambe apresentou maior recuperação da hematita com 59,94 % no pH 6,1, apresentando o maior índice de seletividade de Gaudin de 1,50 e recuperação metalúrgica de 51,03 %. Os outros coletores não tiveram o mesmo comportamento, exibindo índice de seletividade menor que 1 em todos os valores de pH, indicando que o processo se trata de uma flotação aniônica reversa. No sistema de mistura binária com depressor, o ácido oleico e o óleo de semente de uva apresentaram melhor seletividade, ambos com aproximadamente 64 % de dolomita e 36 % de hematita em pH 6,1 e pH 10,5, indicando influência do amido na flotação da dolomita. De um modo geral, a dolomita apresentou boa recuperação em todos os valores de pH, porém com propensão a flotar em pH alcalino e a hematita em pH próximo do neutro. Apesar de não ter ocorrido melhora significativa na seletividade do sistema, pode-se dizer que os óleos vegetais em sua forma saponificada exibem potencial como coletores na flotação, no caso com a rota aniônica reversa de minério de ferro.

Palavras-chave: microflotação, hematita, dolomita, óleos vegetais, coletores.

ABSTRACT

Vegetable oils have natural properties such as low toxicity for both the environment and humans, are biodegradable and derived from renewable resources. Taking into account these characteristics, this class of oil has been studied and applied in the industry as inputs for plastics, resins, biofuels and surfactants. Since collectors are the main inputs in flotation, vegetable oils are already widely used as collectors in this process, exhibit high potential as a raw material due to the constituent fatty acids. This work aimed to evaluate prospectively the potential of vegetable oils of grape seed, cottonseed and crambe, in their saponified form, as collectors in the flotation of dolomitic ores, using sodium oleate as a reference. The microflotation tests were carried out with hematite and dolomite in the Fuerstenau cell and separated into three main stages. The first stage was performed with collector and isolated system, at pH 5; 6.1; 7.2. 8.3 and 9.4 and 50 mg/L collector concentration. In the second stage the tests were performed with an equal synthetic mixture of the minerals, in the same pH range used previously and 20 mg/L collector concentration. The third stage was performed with a binary mixture of the minerals, at pH 6.1, 8.3, 9.4 and 10.5, with the addition of a depressant with a concentration of 3 mg/L and a collector with 50 mg/L. In the isolated system, the best floatability for hematite was at pH 8.3, with 87.02 % for oleic acid and 83.02 % for grape seed oil. For dolomite, all oils showed high floatability at all pHs studied. With the binary mixture and without depressant, crambe oil showed the highest hematite recovery with 59.94 % at pH 6.1, exhibiting the highest Gaudin selectivity index of 1.50 and metallurgical recovery of 51.03 %. The other collectors did not have the same behavior, exhibiting a selectivity index lower than 1 at all pH values, indicating that the process is a reverse anionic flotation. In the binary mixing system with depressant, oleic acid and grape seed oil showed better selectivity, both with approximately 64 % dolomite and 36 % hematite at pH 6.1 and pH 10.5, indicating influence of starch on dolomite flotation. In general, dolomite showed good recovery at all pH values, but with a propensity to float at alkaline pH and hematite at pH close to neutral. Although there was no significant improvement in the selectivity of the system, it can be said that vegetable oils in their saponified form exhibit potential as collectors in flotation, in this case with the iron ore reverse anionic route.

Keywords: microflotation, hematite, dolomite, vegetable oils, collectors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 — Reação de esterificação entre glicerol e ácidos graxos.	16
Figura 3.2 — Estrutura química do ácido hexadecanóico (ácido palmítico).	17
Figura 3.3 — A) Ácido oleico com configuração cis e B) eládico com configuração trans.	19
Figura 3.4 — Flotabilidade da hematita em relação ao pH.	21
Figura 3.5 — Flotabilidade do quartzo em relação ao pH.	21
Figura 3.6 — Processo de saponificação de um glicerídeo.	22
Figura 3.7 — Relação entre a tensão superficial, formação de micelas e CMC.	23
Figura 3.8 — Flotabilidade da apatita em relação ao pH.	24
Figura 3.9 — Flotabilidade em função do pH com 50 mg/L de Flotigam.	27
Figura 3.10 — Flotabilidade em função do pH com 20 mg/L de Hidrocol.	27
Figura 3.11 — Flotabilidade em função do pH com 20 mg/L de ácido oleico.	28
Figura 3.12 — Recuperação da magnesita e dolomita em relação a a) concentração de DDA e b) pH.	29
Figura 4.1 — Fluxograma dos procedimentos da hematita.	33
Figura 4.2 — Fluxograma dos procedimentos da dolomita.	34
Figura 4.3 — Fluxograma dos procedimentos com os óleos vegetais.	34
Figura 4.4 — A) Viscosímetro capilar de Ostwald e B) indicação dos pontos 1 e 2.	37
Figura 4.5 — Tensiômetro de força.	39
Figura 4.6 — Espectrofotômetro e as cubetas com os óleos utilizados.	40
Figura 4.7 — Detalhe da célula de Fuerstenau (1 – torneira de reposição; 2 – impelidor mecânico; 3 – tampão poroso; 4 –torneira para injeção de gás).	42
Figura 4.8 — a) dispersão da partícula na placa de Petri; b) imagem após tratamento.	44

Figura 5.1 — Distribuição granulométrica da hematita.	49
Figura 5.2 — Termograma da hematita.....	50
Figura 5.3 — Composição mineralógica da amostra de hematita.	51
Figura 5.4 — Termograma da dolomita.	52
Figura 5.5 — Composição mineralógica da amostra de dolomita.	53
Figura 5.6 — Assinatura espectral dos óleos vegetais e ácido oleico puros.	57
Figura 5.7 — Assinatura espectral dos óleos vegetais e ácido oleico diluídos em hexano a 7 % (m/V).	57
Figura 5.8 — Flotabilidade da hematita em relação ao pH.	58
Figura 5.9 — Distribuição de espécies do ácido oleico.	59
Figura 5.10 — Flotabilidade da dolomita em relação ao pH.....	59
Figura 5.11 — Flocos de dolomita formados no processo de microflotação.	60
Figura 5.12 — Relação entre pH e estados de dispersão e floculação.	61
Figura 5.13 — Teor de hematita flotado.	62
Figura 5.14 — Teor de hematita no flotado.	64
Figura 5.15 — Teor de dolomita no flotado.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 — Principais ácidos graxos saturados, composição e fórmula molecular....	18
Tabela 3.2 — Principais ácidos graxos insaturados, composição e fórmula molecular.	19
Tabela 5.1 — Parâmetros de caracterização granulométrica da hematita.	49
Tabela 5.2 — Caracterização dos óleos utilizados.	54
Tabela 5.3 — Composição dos óleos vegetais.	54
Tabela 5.4 — Concentração micelar crítica dos reagentes.	56
Tabela 5.5 — Recuperação metalúrgica (RM) e índice de seletividade (IS) da hematita no flotado.	63
Tabela 5.6 — Recuperação metalúrgica (RM) e índice de seletividade (IS) da hematita no afundado.	63
Tabela 5.7 — Recuperação metalúrgica e índice de seletividade da hematita no flotado com depressor.	65
Tabela 5.8 — Recuperação metalúrgica e índice de seletividade da hematita no afundado com depressor.	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	Objetivo geral	15
2.2	Objetivos específicos	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1	Óleos vegetais	16
3.2	Ácidos graxos	17
3.2.1	Ácidos graxos saturados	18
3.2.2	Ácidos graxos insaturados	18
3.3	Óleos vegetais como coletores na flotação	20
3.4	Flotação de minério de ferro	25
3.5	Flotação de carbonatos.....	26
3.6	Amido de mandioca como depressor na flotação	29
3.7	Calcinação.....	31
3.8	Análise de imagem.....	32
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
4.1	Preparo da hematita	35
4.2	Preparo da dolomita	35
4.3	Caracterização das amostras minerais	35
4.4	Caracterização dos óleos vegetais.....	36
4.5	Preparo dos insumos para os ensaios de microflotação	41
4.5.1	Solução-mãe de coletor	41

4.5.2	Gelatinização do amido	41
4.6	Ensaio de microflotação	42
4.6.1	Ensaio sem depressor e sem mistura de minerais	42
4.6.2	Ensaio sem depressor e com mistura de minerais.....	43
4.7	Análise de imagem.....	44
4.8	Método da densidade	45
4.9	Método da perda de massa por calcinação.....	46
4.10	Ensaio com depressor e mistura de minerais	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1	Caracterização das amostras minerais	49
5.1.1	Hematita	49
5.1.2	Dolomita.....	52
5.2	Caracterização dos óleos.....	54
5.3	Ensaio de microflotação sem depressor e minerais separados	58
5.4	Ensaio de microflotação sem depressor e com mistura sintética	62
5.5	Ensaio de microflotação com depressor e mistura sintética.....	64
6	CONCLUSÃO.....	67
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	68
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
	APÊNDICE	76
	ANEXO	87

1 INTRODUÇÃO

Os principais depósitos de minério de ferro no Brasil apresentam hematita como componente predominante e ganga silicosa composta principalmente por quartzo. No entanto, com a exaustão dos depósitos de alto teor, os minérios se apresentam mais complexos e, não raramente, com presença de minerais carbonáticos como a dolomita e calcita (LELIS, 2014).

Devido a depleção das reservas de alto teor de minério de ferro e aumento da demanda, uma variedade de métodos de beneficiamento é empregada no processo de minério de ferro com teores intermediários a baixo (MA, 2012). A flotação surgiu para solucionar os problemas de materiais finos e complexos cujo processo baseia-se no controle seletivo da molhabilidade dos materiais constituintes (LUZ, 2016).

Nesse processo, os coletores são os principais insumos utilizados para a separação dos materiais. Um dos reagentes mais utilizados na flotação aniônica é o ácido oleico na sua forma de oleato após o processo de hidrólise alcalina. Insumos alternativos para a flotação já são amplamente estudados, principalmente os sais de ácidos graxos de óleos, apresentando alto potencial devido aos ácidos graxos constituintes vegetais (BRANDÃO, CAIRES; QUEIROZ, 1994).

Os principais óleos vegetais apresentam em sua composição ácidos graxos com cadeia hidrocarbônica longa, com 16 ou 18 átomos de carbono, além de ácidos graxos insaturados em maior proporção em relação aos saturados (JORGE, 2009). Essas características influenciam na eficiência do insumo como coletor na flotação (CAIRES, 1992).

Juntamente com sua composição, o interesse pelos óleos vegetais também se estende às propriedades naturais do material que além de apresentarem baixa toxicidade, são biodegradáveis e derivados de recursos renováveis (ERHAN, 2005). Levando em conta essas características, esse tipo de óleo vêm sendo estudado e aplicado na indústria como insumos de plásticos, resinas, biocombustível e surfactantes.

Logo, foi proposto neste trabalho o estudo de insumos de fontes naturais e sua aplicabilidade na flotação de minério de ferro, visando avaliar o potencial de alguns óleos vegetais e aumentar a seletividade entre hematita e dolomita.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial, ainda em nível prospectório, dos sabões de óleos vegetais de semente de uva, caroço de algodão e crambe como coletores na flotação de minérios dolomíticos através da microflotação seletiva entre minério de ferro (hematita) e carbonatos (dolomita), em comparação com ácido oleico.

2.2 Objetivos específicos

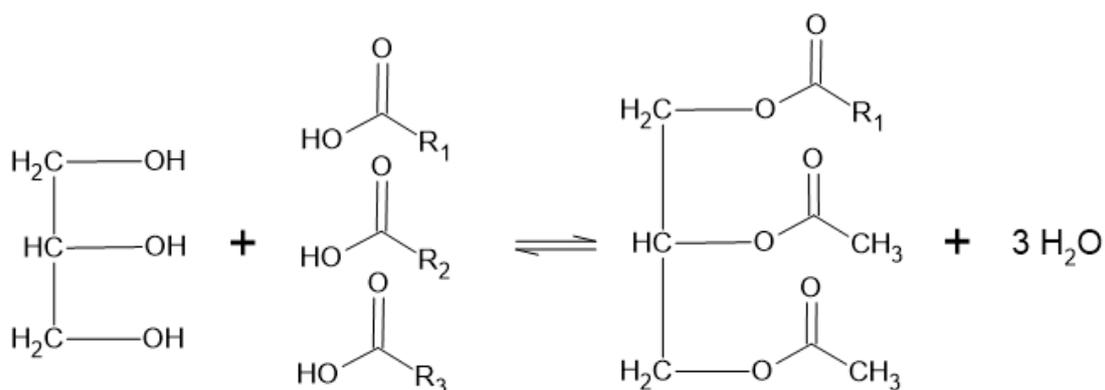
- Caracterização dos minerais purificados e dos óleos vegetais;
- Realizar ensaios de microflotação em sistema simplificado e avaliar o comportamento dos minerais;
- Avaliar o comportamento a atuação dos coletores em sistema binário através de ensaios de microflotação com apenas coletor;
- Determinar a seletividade do processo por meio de ensaios de microflotação com sistema binário com coletor e depressor;
- Quantificar a influência do pH no processo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Óleos vegetais

O óleo vegetal é definido como uma substância de origem vegetal, insolúvel em água e formada essencialmente por triglicerídeos, que é um produto da esterificação entre glicerol e ácidos graxos. As maiores fontes de óleos vegetais são sementes de plantas de clima temperado, sendo os de maior interesse os óleos de soja, canola, milho amendoim e girassol (NUNES, 2013). Segundo Jorge (2009) também pode ser extraído da polpa de frutos, sendo denominados como azeites, como os azeites de oliva e dendê. A Figura 3.1 apresenta a reação de esterificação entre glicerol e ácidos graxos.

Figura 3.1 — Reação de esterificação entre glicerol e ácidos graxos.

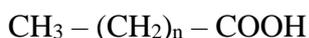


Fonte: autoria própria.

Apesar da constituição básica de óleos e gorduras serem os triglicerídeos, suas características moleculares são responsáveis por essa diferença física. As gorduras apresentam na composição predominância de triglicerídeos saturados, conferindo maior ponto de fusão e dando a característica sólida à temperatura ambiente. Já os óleos são constituídos majoritariamente de triglicerídeos insaturados, apresentando menor ponto de fusão e sendo líquidos à temperatura ambiente (JORGE, 2009; NUNES, 2013).

3.2 Ácidos graxos

De acordo com Nunes (2013), os ácidos graxos são substâncias orgânicas pertencentes ao grupo dos ácidos carboxílicos, que são compostos orgânicos constituídos de uma longa cadeia de carbono e hidrogênio (cadeia hidrocarbônica) e um grupo funcional carboxila em uma das extremidades. Pode ser representado da seguinte forma:

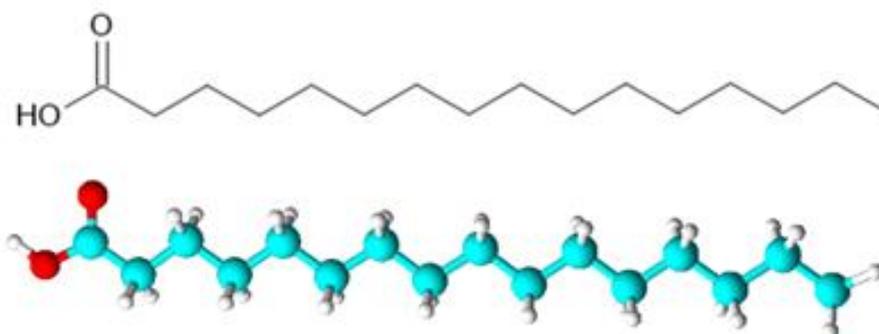


Tal forma pode ser expressa genericamente pela notação:



onde R representa a cadeia hidrocarbônica e COOH a carboxila. A Figura 3.2 apresenta a estrutura química e sua representação em 3D de um ácido graxo.

Figura 3.2 — Estrutura química do ácido hexadecanóico (ácido palmítico).



Fonte: autoria própria.

Grande parte dos ácidos graxos de óleos e gorduras comestíveis apresentam cadeia carbônica longa, de 16 a 18 carbonos, ainda que alguns alimentos apresentem cadeias menores de 12 a 14, ou até mesmo maiores de 20 ou 22 carbonos. Os ácidos graxos podem ser definidos como saturados ou insaturados, sendo diferenciados através do comprimento da cadeia hidrocarbônica, os tipos de ligações entre os carbonos e posição das duplas ligações. Se na cadeia hidrocarbônica apresentar apenas ligações simples, o ácido graxo é referido como saturado (por hidrogênio). Contudo, se apresentar pelo menos uma ligação dupla, é denominado insaturado (MORETTO, 1988 *apud* OLIVEIRA, 2005; NUNES 2013).

3.2.1 Ácidos graxos saturados

Os ácidos graxos saturados não apresentam ligações duplas em sua cadeia hidrocarbônica. Os ácidos de cadeia carbônica curta (inferior a 10 carbonos) são líquidos à temperatura ambiente e, quando apresentam mais de 10 carbonos na cadeia, passam a ser sólidos (CAIRES, 1992; JORGE, 2009; NUNES, 2013).

A ausência de ligações duplas na cadeia contribui para que os óleos sejam mais estáveis perante o processo de degradação e rancidez (JORGE, 2009). A Tabela 3.1 apresenta os principais ácidos graxos saturados.

Tabela 3.1 — Principais ácidos graxos saturados, composição e fórmula molecular.

Nomenclatura IUPAC	Nome comum	Átomos de carbono	Simbologia	Fórmula molecular
Ácido dodecanóico	Ácido láurico	12	C12	C ₁₂ H ₂₄ O ₂
Ácido tetradecanóico	Ácido mirístico	14	C14	C ₁₄ H ₂₈ O ₂
Ácido hexadecanóico	Ácido palmítico	16	C16	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
Ácido octadecanóico	Ácido esteárico	18	C18	C ₁₈ H ₃₆ O ₂

Fonte: Adaptado de Nunes, 2013 e Caires, 1992.

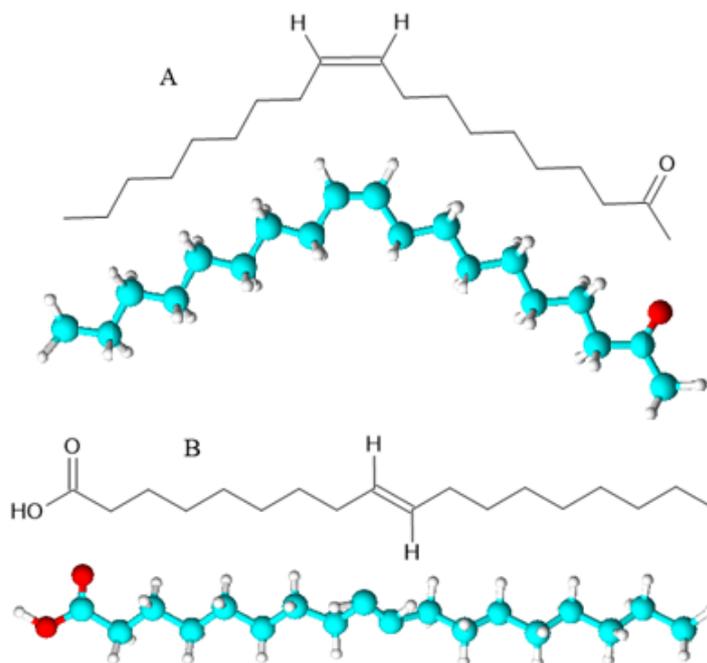
3.2.2 Ácidos graxos insaturados

Diferente dos ácidos graxos saturados, os insaturados apresentam ligações duplas ou mais na cadeia hidrocarbônica, podendo ser mono- (apenas uma dupla ligação) ou poli- (mais de uma dupla ligação) insaturados (CAIRES, 1992; NUNES, 2013).

Os ácidos graxos insaturados possuem menor estabilidade frente a processos degradativos em relação aos saturados, principalmente a oxidação. De modo geral, esta instabilidade aumenta na medida em que o número de insaturações aumenta (NUNES, 2013).

Dependendo da orientação geométrica dos átomos, podem ser classificados em *cis*, quando átomos de hidrogênio estão orientados para o mesmo lado, e *trans*, se estiverem em lados opostos, como mostra a Figura 3.3 (CAIRES, 1992; NUNES, 2013).

Figura 3.3 — A) Ácido oleico com configuração cis e B) eládico com configuração trans.



Fonte: autoria própria.

A Tabela 3.2 apresenta os ácidos graxos insaturados mais comuns.

Tabela 3.2 — Principais ácidos graxos insaturados, composição e fórmula molecular

Nomenclatura IUPAC	Nome comum	Átomos de carbono	Simbologia	Fórmula molecular
Ácido (Z)-octadec-9-enóico	Ácido oléico	18	C18:1	C ₁₈ H ₃₄ O ₂
Ácido cis,cis-9,12-octadecadienoico	Ácido linoléico	18	C18:2	C ₁₈ H ₃₂ O ₂
Ácido (9 Z , 12 Z , 15 Z) - octadeca-9,12,15-trienóico	Ácido α - linolênico	18	C18:3	C ₁₈ H ₃₀ O ₂

Fonte: Adaptado de Nunes, 2013 e Caires, 1992.

Os principais óleos vegetais são compostos predominantemente por ácidos graxos com 16 ou 18 átomos de carbono na cadeia, tendo os ácidos graxos insaturados em maior proporção em sua composição, em relação aos saturados (JORGE, 2009; NUNES, 2013).

3.3 Óleos vegetais como coletores na flotação

De acordo com Erhan (2005), os óleos vegetais vêm sendo utilizados em diversas aplicações industriais, tais como plásticos, solventes, resinas, emulsificantes, biocombustível e surfactantes. Esse interesse é devido às propriedades naturais no material: apresentam baixa toxicidade para humanos e meio ambiente, são derivados de recursos renováveis e são inerentemente biodegradáveis.

Os sais de ácidos graxos provenientes de óleos vegetais já são amplamente estudados como coletores nos processos de flotação aniônica (BRANDÃO, CAIRES; QUEIROZ, 1994), apresentando alto potencial como matéria-prima por conta dos ácidos graxos constituintes, principalmente aqueles que apresentam grande quantidade de ácido oleico em sua composição (MILHOMEM, 2020).

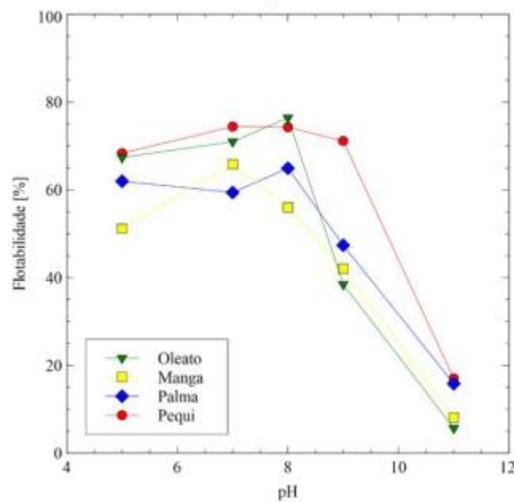
Vieira *et al.* (2005) investigaram o desempenho dos óleos vegetais de rícino (mamona), coco, pequi e gergelim como coletores na microflotação de calcita nas concentrações de 292 g/t, 730 g/t e 1460 g/t. Os resultados indicaram maior desempenho do óleo de pequi e gergelim nas concentrações de 730 e 1460 g/t em todos os pH, produzindo resultados semelhantes à flotação do com ácido oleico puro, seguido por óleo de mamona e óleo de coco. Ensaios efetuados na década de 1980 mostraram excelente desempenho, em termos de seletividade e flotabilidade, de óleo de pequi saponificado, na flotação aniônica direta do minério carbonatítico da mina de Tapira, Minas Gerais (REZENDE, 1992).

Costa (2012) avaliou os óleos de buriti, de semente de maracujá, de inajá, de castanha do Pará, de semente de andiroba e polpa de açaí como coletores na flotação de minério fosfático. Os óleos de buriti, inajá, andiroba e açaí apresentaram resultados semelhantes e recuperação próxima de 100 % na concentração de 2,5 mg/L. Já os coletores produzidos a partir de semente de maracujá e castanha do Pará requereram concentração de 5 mg/L obterem máxima recuperação.

Silva *et al.* (2015) avaliaram o uso do óleo de polpa amarela de pequi na flotação de apatita. Foi observado que nas concentrações ensaiadas (2,5; 5; 7,5 e 10 mg/L) a recuperação foi acima de 95 % nos pH 9 e 10, além disso, os resultados foram similares ao coletor Flotigam 5806, usado como parâmetro, em alguns pontos como na concentração de 2,5 mg/L no pH 9 e 5 mg/L no pH 10.

Milhomem (2020) estudou a aplicabilidade dos óleos de manga, pequi e palma na microflotação de hematita e quartzo no consumo unitário de 625 g/t e nos valores de pH 5, 7, 8, 9 e 11. Os óleos saponificados apresentaram boa flotabilidade de hematita no pH 8 e concentração de 75 mg/L, destacando-se o óleo de pequi, com 74,28 %, como pode ser observado na Figura 3.4.

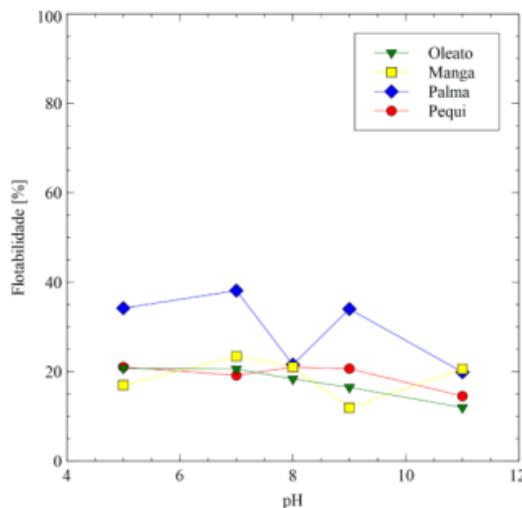
Figura 3.4 — Flotabilidade da hematita em relação ao pH.



Fonte: Milhomem (2020).

Já para o quartzo, nenhum reagente apresentou boa flotabilidade, nos potenciais hidrogeniônicos experimentados, com valores inferiores a 50 %. Como pode ser observado na Figura 3.5, o óleo de palma obteve o melhor resultado, principalmente no pH 8.

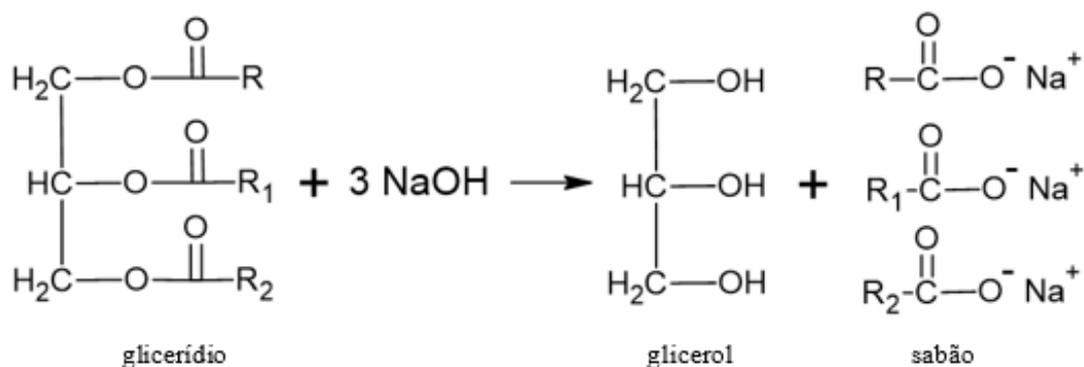
Figura 3.5 — Flotabilidade do quartzo em relação ao pH.



Fonte: Milhomem (2020).

Para serem utilizados na flotação de minérios, os óleos vegetais passam pelo processo de hidrólise alcalina (saponificação) e são transformados em surfactantes para obter solubilidade e poderem atuar como coletores na flotação (COSTA, 2012). A Figura 3.6 representa o processo de saponificação de um glicerídeo.

Figura 3.6 — Processo de saponificação de um glicerídeo.



Fonte: autoria própria.

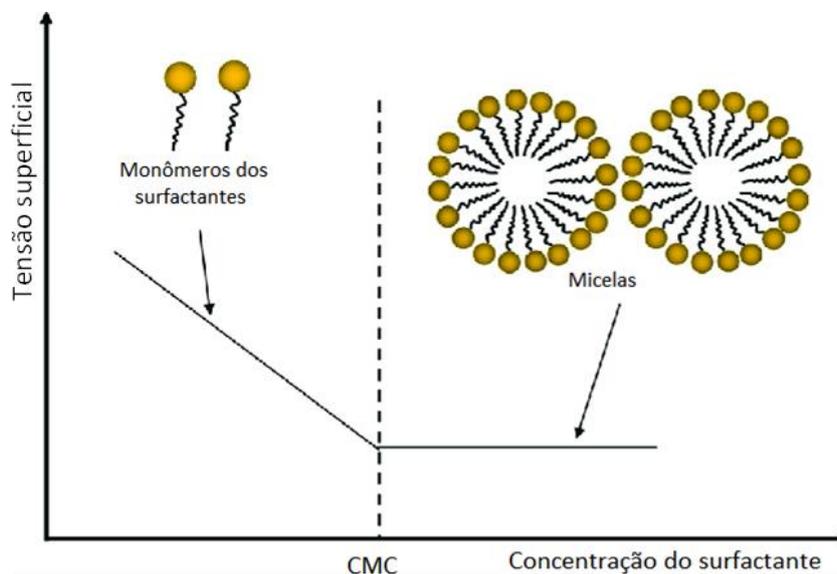
Os surfactantes são moléculas anfipáticas que apresentam um grupo apolar (**R**), uma cadeia hidrocarbônica que representa a parte hidrofóbica da molécula, e um grupo polar (**Z**) que representa a parte hidrofílica. Na flotação atuam na interface sólido/líquido, adsorvendo na superfície no mineral, fazendo com que este apresente um caráter hidrofóbico (SHAW, 1975; LEJA, 1982).

Segundo Leja (1982), os surfactantes podem ser classificados de acordo com a carga elétrica do seu grupo polar (catiônico, aniônico ou não iônico), estrutura do hidrocarboneto (alquil, aril, fenil, ciclohexil, etc.) ou entre monopolares e multipolares. Esta última classificação pode ser subdividida em três classes: tiocompostos (coletores de sulfetos metálicos), não tio (agem como coletores e espumantes) e não iônicos (atuam como espumantes, ativadores e depressores).

De acordo com Shaw (1975), a diminuição da tensão superficial é outro efeito dos surfactantes em água. Esse fenômeno ocorre pelo fato de que as moléculas anfipáticas se aglomeram na interface ar/água do que na solução, resultando em uma maior coesão entre as moléculas da superfície. A tensão superficial diminuiu à medida que a concentração do surfactante aumenta, até atingir um valor em que se mantém constante independente da adição de mais sal. Este valor é chamado de concentração micelar crítica (CMC),

correspondendo à concentração em que as moléculas anfipáticas começam a se agrupar formando micelas. A Figura 3.7 mostra a relação entre a tensão superficial, concentração do surfactante e a CMC.

Figura 3.7 — Relação entre a tensão superficial, formação de micelas e CMC.



Fonte: Akbari et. al (2018).

A eficiência dos ácidos graxos como coletores na flotação é influenciada pelas características da cadeia carbônica, tais como grau de insaturação da cadeia hidrocarbônica e número de átomos de carbono. O aumento da cadeia hidrocarbônica resulta no aumento do poder de coleta dos carboxilatos. Também é observado que os ácidos graxos insaturados são mais eficientes como coletores do que os saturados com mesmo número de carbonos (CAIRES, 1992).

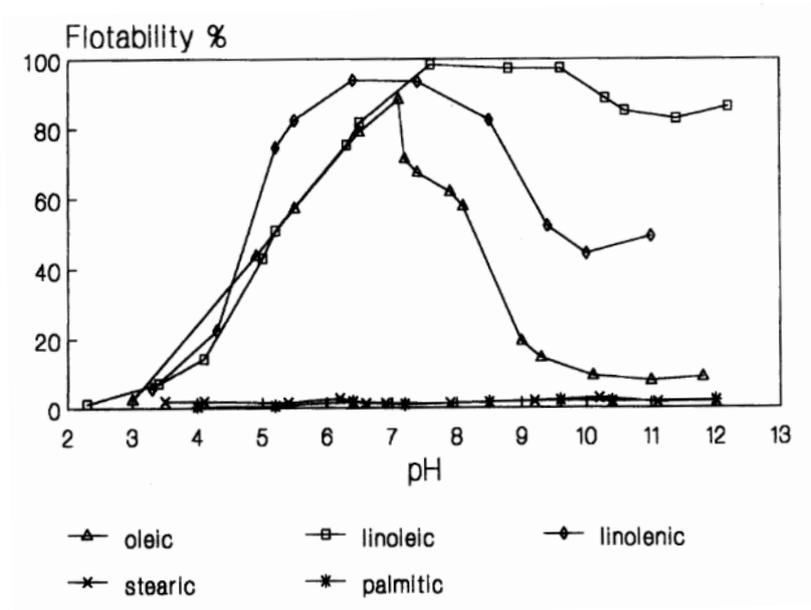
Há também outros fatores que influenciam a eficiência da flotação, como o pH da solução, solubilidade dos minerais, grau de liberação, dosagem do coletor, entre outros (OLIVEIRA, 2005).

Caires (1992) estudou a flotação de fluorita e apatita usando óleos vegetais (azeite de oliva, óleo de arroz, óleo de soja e óleo de linhaça) como coletores. Seus resultados indicaram a superioridade do poder de coleta dos ácidos graxos insaturados (oleico, linoleico e linolênico) perante os saturados (palmítico e esteárico) para ambos os minerais.

Brandão *et al.* (1994) estudaram a microflotação de apatita utilizando sais de ácidos graxos, cujos resultados encontrados estão indicados na Figura 3.8. Foi concluído que a

eficiência da coleta dos ácidos graxos, em ordem crescente, foi: oleico, linolênico e linoleico, em condições básicas de pH. Nas mesmas condições, os ácidos palmítico e esteárico não apresentaram resultados significantes.

Figura 3.8 — Flotabilidade da apatita em relação ao pH.



Fonte: Brandão et. al (1994).

A influência do grau de saponificação do ácido oleico na flotação de apatita foi estudada por Oliveira, Luz, Ferreira (2006). Concluíram que o grau de saponificação que apresentou resultados mais significantes foi o 55 %. No entanto, os resultados também sugerem que a saponificação dos óleos em níveis elevados não necessariamente implica em melhores condições de flotação da apatita.

3.4 Flotação de minério de ferro

Com a depleção das reservas de minério de ferro de alto teor e demanda em crescimento, uma variedade de métodos de beneficiamento está sendo empregados no processo de minério de ferro de teores intermediários a baixos (MA, 2012).

A flotação é uma alternativa para beneficiamento que surgiu para resolver os problemas dos finos e os minérios complexos. Seu mecanismo se baseia na molhabilidade dos materiais constituintes, aproveitando a diferença de hidrofobicidade das partículas (LUZ, 1996).

O principal mineral de ganga presente em minérios de ferro é o quartzo. Sendo assim, existem três rotas de flotação: catiônica reversa, aniônica direta e aniônica reversa com quartzo ativado. A flotação catiônica reversa é a mais utilizada cujo processo se dá pela flotação do quartzo com aminas. Na flotação aniônica direta de óxidos de ferro, os ácidos graxos são utilizados como coletores, sendo uma rota para concentração de minérios de baixo teor. A aniônica reversa de quartzo ativado era um processo empregado no passado quando as aminas não estavam à disposição (ARAÚJO, 2006; PERES, ARAÚJO, 2009).

Luz (1996) estudou a flotação aniônica direta de hematita e quartzo utilizando os óleos de arroz e rícino como coletores. Os resultados apontam que a melhor faixa de pH para utilização de ácidos graxos saponificados foi entre pH 6 e pH 8 e que o óleo de rícino apresenta menor seletividade comparado com o óleo de arroz, ambos na mesma dosagem.

Lopes e Lima (2009) efetuaram ensaios de flotação direta de minério de ferro com oleato de sódio como coletor. Foi observado uma maior flotabilidade da hematita com concentração de coletor de 50 mg/L, destacando no pH 7. Para o quartzo, o melhor resultado foi no pH 9 com concentração de 70 mg/L do oleato de sódio. Também foram realizados ensaios com metassilicato de sódio como depressor, porém não há separação seletiva, uma vez que o reagente deprimiu tanto o quartzo quanto a hematita.

3.5 Flotação de carbonatos

De acordo com Lelis (2014), os principais depósitos de minério de ferro no Brasil apresentam a hematita como componente predominante e ganga silicosa composta principalmente por quartzo. No entanto, com a exaustão dos depósitos de alto teor do Quadrilátero Ferrífero, os minérios se apresentam mais complexos e, não raramente, com presença de minerais carbonáticos, como dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) e calcita (CaCO_3).

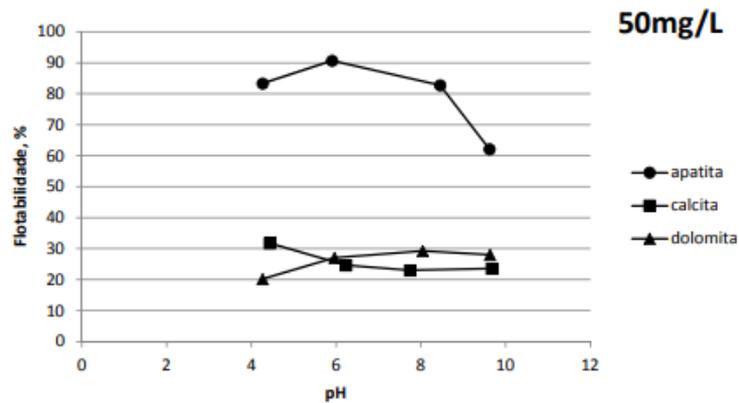
O itabirito dolomítico é uma rocha que apresenta transição entre bandas escuras de óxido de ferro, ricas em hematita e quartzo para bandas claras, ricas em dolomita e carbonatos. Seus principais componentes (nominais, expressos em termos de óxidos) são Fe_2O_3 , CaO e MgO (ROSIÈRE e CHEMALE 2000; SPIER, 2005).

Por serem minérios pobres, os itabiritos precisam passar por etapas de concentração a fim de atender às demandas do mercado. Os processos mais aplicados na indústria são os métodos magnéticos, gravíticos e flotação catiônica (LELIS, 2014).

Costa (2009) avaliou a seletividade na microflotação de hematita, dolomita e quartzo com alguns coletores e depressores. Para o quartzo, o consórcio amina/oleato obteve excelente resultado no consumo unitário de 1500 g/t, chegando a 100 % de flotabilidade. A hematita apresentou resultado promissor com o oleato de sódio nas faixas de pH 5,5 a pH 6,5 com consumo unitário de 300 g/t. Para a dolomita, o consórcio amina/oleato foi o que apresentou melhor flotabilidade, sendo por volta de 55 % em todos os valores de pH, com o consumo unitário de 1500 g/t.

Lopes (2013) avaliou o potencial de coletores catiônico (Flotigam EDA) e aniônico (Hidrocol e ácido oleico) para apatita, calcita e dolomita através de ensaios de microflotação. Como pode se observar na Figura 3.9, houve boa recuperação com o Flotigam para apatita, com máxima de 90 % no pH 6 apresentando seletividade.

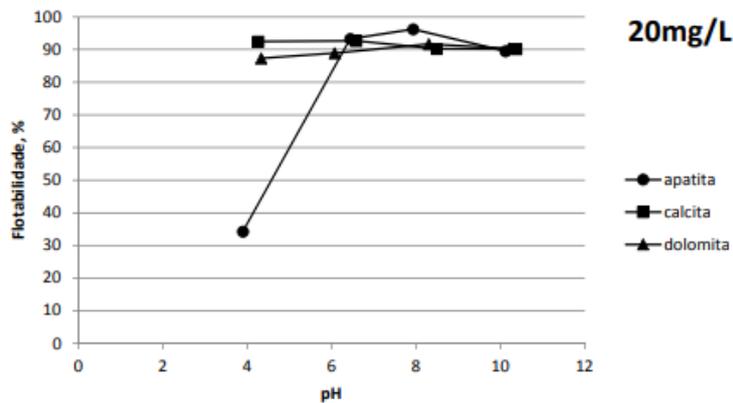
Figura 3.9 — Flotabilidade em função do pH com 50 mg/L de Flotigam.



Fonte: Lopes (2013).

O Hidrocol não foi seletivo na flotação dos três minerais., como mostra a Figura 3.10. Apenas a apatita apresentou sensibilidade ao pH, resultando em uma janela de seletividade entre a apatita e os demais minerais no pH 4.

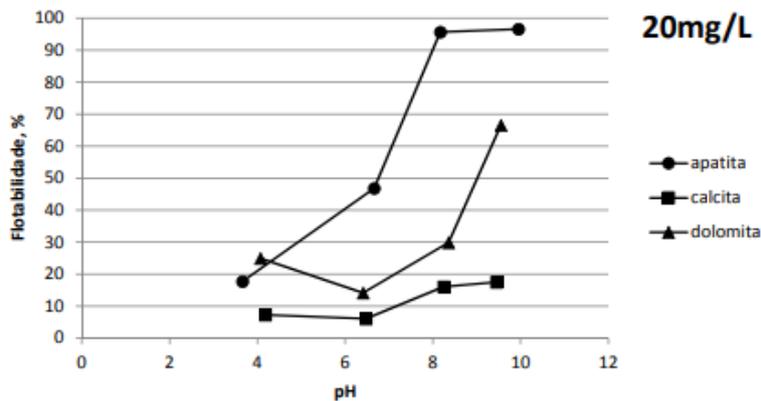
Figura 3.10 — Flotabilidade em função do pH com 20 mg/L de Hidrocol.



Fonte: Lopes (2013).

Em relação ao ácido oleico, o reagente apresentou certa seletividade para a apatita e um pouco para a dolomita. Porém, como indica a Figura 3.11, a maior seletividade foi entre apatita e calcita no pH 8 e 20 mg/L do reagente.

Figura 3.11 — Flotabilidade em função do pH com 20 mg/L de ácido oleico.



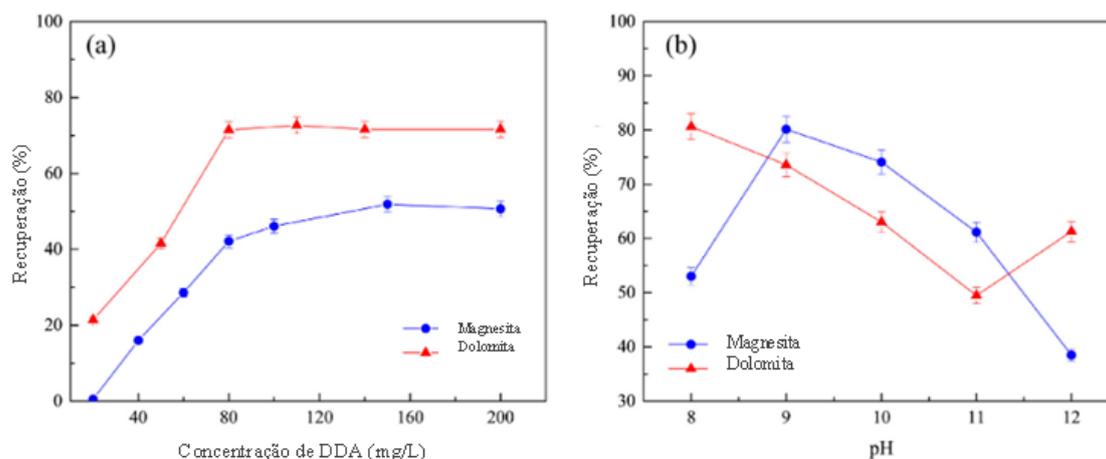
Fonte: Lopes (2013).

Luo *et al.* (2016) avaliaram o comportamento da siderita (FeCO_3) e dolomita na flotação hematita com quartzo, utilizando oleato de sódio como coletor e amido como depressor. Os resultados indicaram adsorção de CaCO_3 no quartzo, afetando sua interação com as moléculas de amido e reduzindo sua recuperação.

Raso (2018) estudou o uso de óleo de soja e ácido oleico como coletores na flotação de dolomita. Ambos os coletores apresentaram flotabilidade alta para dosagens de 32 mg/L em pH 6 para o óleo de soja e pH 8 para o ácido oleico. Além disso, no sistema hematita/dolomita sem depressor, os resultados de seletividade indicaram a preferência dos ácidos graxos em adsorverem na superfície da dolomita.

Zhang *et al.* (2018) estudou o uso de dodecilamina (DDA) na flotação de dolomita e magnesita. Os ensaios de microflotação exibidos na Figura 3.12a mostram que as dosagens entre 80 e 200 mg/L apresentam as melhores condições de recuperação para ambos os minerais. Em relação a Figura 3.12b, o pH 8 e 9 apresentam as melhores condições de flotabilidade, no entanto pode ser observado uma certa seletividade apenas no pH 8.

Figura 3.12 — Recuperação da magnesita e dolomita em relação a a) concentração de DDA e b) pH.



Fonte: adaptado de Zhang *et al.* (2018).

Raso, Lameiras, Albuquerque (2019) estudaram a flotação hematita e dolomita com óleo de soja como coletor e amido de milho como depressor. Na microflotação verificaram que o óleo de soja tende a flotar a dolomita no pH 6 e o amido de milho deprime preferencialmente a hematita em pH maior que 10. Os ensaios em bancada revelaram o melhor resultado com 351 g/t de amido de milho e 400 g/t de óleo de soja em pH 10,5.

3.6 Amido de mandioca como depressor na flotação

Na flotação, o principal depressor de óxidos de ferro é o amido, sendo o de milho a espécie mais empregada devido à disponibilidade em grandes quantidades. É composto principalmente por amilopectina e amilose, podendo conter impurezas como proteínas e óleo, que em grandes proporções atuam como agente antiespumante (ARAÚJO; VIANA; PERES, 2005). A proteína mais abundante é a zeína, responsável pela ação depressora no minério de ferro (CORRÊA, 1994).

Devido ao tamanho das moléculas que se estendem na solução, os amidos podem agir como floculante em processos de espessamento e aditivo nos processos de aglomeração (AGUIAR, 2014). Dentre as características que tornam o amido um reagente de interesse, podem se destacar: alta disponibilidade, é biodegradável e não tóxico, apresenta baixo custo, facilidade de obtenção e produção (HADZERIGA; GIANNINI, 1988).

O amido também está presente em outras espécies vegetais como a mandioca, considerada a mais atrativa por crescer amplamente em países de clima quente e não necessitar de fertilização ou correção do solo. Seu amido apresenta baixo teor de óleo e viscosidade

maior que o amido de milho, o que pode indicar maior massa molecular e ação depressora (PERES; CORREA, 1996).

Para serem utilizados como depressores, os amidos não modificados de grande massa molecular devem passar pelo processo de gelatinização, que pode ser realizada por meio da água morna ou adição de hidróxido de sódio (ARAÚJO; VIANA, PERES., 2005).

Pavlovic e Brandão (2003) avaliaram o efeito do amido, amilose e amilopectina na flotação de hematita e quartzo. Foi observado que o amido, amilose e amilopectina apresentam menos de 30 % de hematita flotada. Em relação ao quartzo, a amilose obteve o pior resultado como depressor, atingindo por volta de 70 % na concentração de 100 mg/L, enquanto o amido e amilopectina, nessa concentração, obtiveram recuperação de 30 % e 40 % respectivamente.

Souza et. al (2014) realizaram estudos de oito depressores diferentes, tanto orgânicos quanto inorgânicos, na flotação aniônica de um fosfato sílico-carbonatado. Os resultados indicaram melhor ação depressora do amido de mandioca, sendo mais eficiente do que o amido de milho.

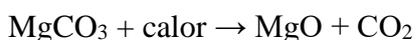
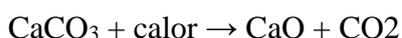
Souza e Magalhães (2016) avaliaram o uso de depressores alternativos na flotação catiônica reversa de minério de ferro. As fontes de amido utilizadas foram amido de mandioca, fécula de batata, fécula de mandioca e amido de milho para comparação. Os resultados para fécula de batata indicaram maior adsorção no quartzo, tendo flotabilidade de aproximadamente 30 a 70 %, que diminui com o aumento da concentração do depressor. A fécula de mandioca apresentou alta flotabilidade do quartzo (maior que 80 %) em todas as concentrações utilizadas. Já o amido de mandioca obteve o pior resultado, com flotabilidade de 25 a 55 % para o quartzo. Para a hematita, todos os depressores obtiveram resultados abaixo de 25 %.

Melo et al. (2017) estudaram a flotação catiônica reversa e minério de ferro utilizando amido de milho, amido de tapioca (também conhecido como amido de mandioca), CMC (carboximetilcelulose) e ácido húmico como depressores. O amido de tapioca e ácido húmico apresentaram melhores resultados, contendo respectivamente 3,4 % e 3,3 % de sílica no concentrado. Em relação aos coletores, foram utilizados uma série de reagentes clássicos e todos apresentaram resultados satisfatórios com recuperação entre 66,4 % e 68,8 %.

3.7 Calcinação

Calcinação é o processo de transformação através de tratamento térmico de carbonatos e hidratados com intuito de remover o CO₂, água e outros gases e ocorre em temperatura na faixa de 900 a 1000 °C (ROSENQUIST, 1983 *apud* CAMPOS *et al.*, 2018, SAMPAIO e ALMEIDA, 2008).

Segundo Campos *et al.* (2018) o processo é utilizado sobretudo na produção de óxidos, como mostram as reações químicas abaixo:



A cal ou óxido de cálcio (CaO) é um dos produtos derivados da calcinação do calcário ou do dolomito, uma rocha comumente utilizada na produção de cal. As temperaturas de calcinação variam de acordo com a composição do carbonato, por exemplo, o MgCO₃ se decompõe por volta de 400 °C e enquanto o CaCO₃ na faixa de 850 a 900 °C (SAMPALIO e ALMEIDA, 2008).

Durante o aquecimento, na temperatura que ocorre a decomposição, tem-se início um novo arranjo estrutural da rocha. Por conta da elevação da temperatura e prolongamento do aquecimento, essa alteração tende a tornar a estrutura da rocha mais densa de forma a eliminar os vazios da estrutura (CUNHA, 1949 *apud* CAMPOS *et al.*, 2018). Estes vazios são canais para ingresso de água, facilitando a hidratação da cal e seu aproveitamento (CAMPOS *et al.*, 2018).

Em relação a perda de massa, tomando um bloco de calcário calcina, este tende a diminuir a massa em 44 % e de volume de 12 a 20 %. Do caso da dolomita, há redução em massa de 48 % (SAMPALIO e ALMEIDA, 2008).

3.8 Análise de imagem

Muitos laboratórios não possuem equipamentos caros, sendo necessário o uso de alternativas para se obterem informações desejadas, mesmo que a informação seja semiquantitativa. Uma técnica promissora é a análise de imagens, porém geralmente requer instrumentos sofisticados (MILHOMEM e LUZ, 2018).

Milhomem e Luz (2018), avaliaram um método acessível de determinação do teor de minerais através da colorimetria em um laboratório estudantil utilizando celulares. Foram utilizadas amostras de hematita e quartzo para a avaliação utilizando o índice de coloração, permitindo a predição de hematita em misturas sintéticas. As misturas foram preparadas com 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % e 100 % de hematita. As análises foram realizadas utilizando dois aplicativos para Android: *Color Meter* da VisTech Projects e *Color Analysis* da Research Lab Tool, ambos apresentando resultados na forma de RGB e posteriormente aplicando a função Kubelka-Munk e comparando com o índice de coloração. Os resultados indicaram que o índice de coloração foi melhor que a função Kubelka-Munk na estimativa do teor de hematita. Além disso, a abordagem indicou ser promissora no contexto de utilização de métodos de baixo custo e fácil execução.

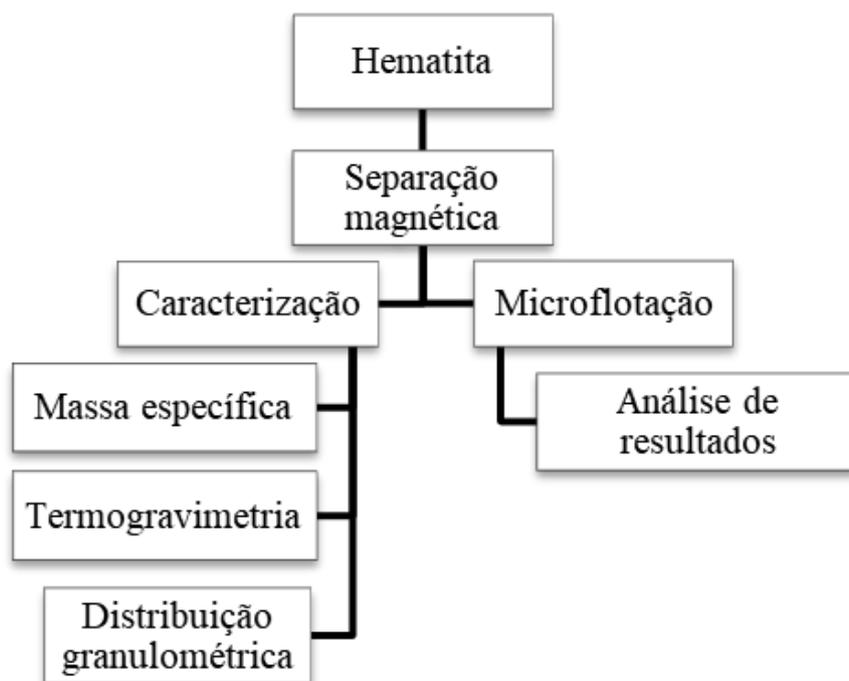
Neuppmann (2019) quantificou os teores hematita e quartzo da microflotação através da análise de imagem. A quantificação consistiu na análise de histogramas de pixels construídos pelo software *IrfanView*®. Primeiramente foi construído uma curva de calibração com mistura binária de com 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % e 100 % e quartzo utilizando um microscópio digital (com conexão USB) para tomada das imagens. Como o mencionado programa de imagem não habilita a função de determinação de histograma em imagem puramente em preto e branco, para gerar histograma das imagens binarizadas (em preto e branco), um minúsculo retângulo vermelho (de poucos pixels) foi adicionado nos campos da imagem, possibilitando, assim a habilitação daquela função residente em imagens coloridas. Adicionalmente, para gerar maior confiabilidade estatística, um algoritmo baseado na utilização de multiplicadores de Lagrange com inclusão de uma variável virtual foi utilizado, segundo procedimento preconizado por Luz (1999). Seus resultados indicaram um coeficiente de determinação (o quadrado do coeficiente de correlação linear) com 95,99 % de ajuste aos dados experimentais.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os minerais utilizados foram hematita e dolomita, de amostras monominerais. A dolomita utilizada era proveniente da Pedreira Bemil, no Município de Ouro Preto e a hematita oriundo da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN).

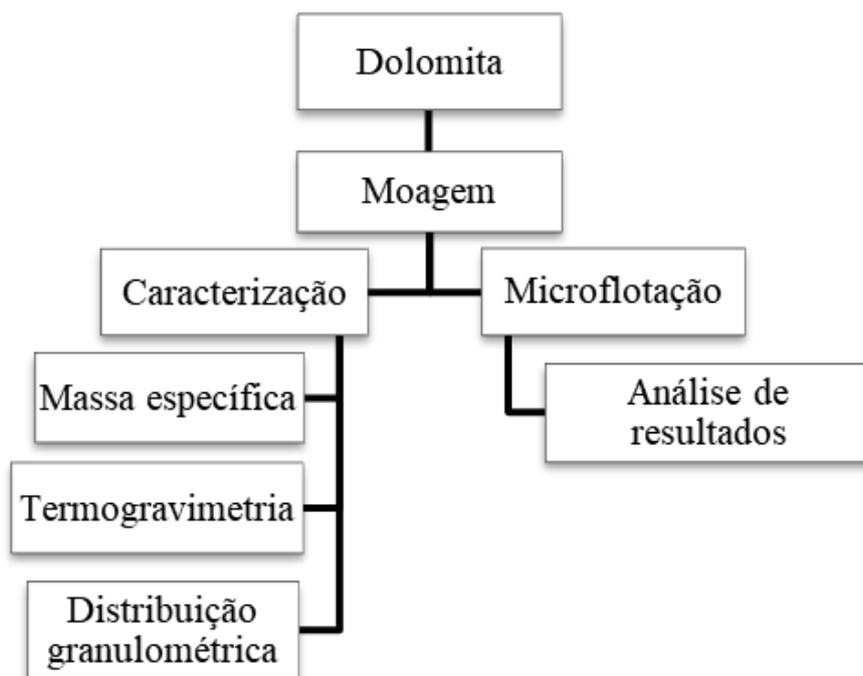
O trabalho foi dividido em duas partes principais, sendo que na primeira foram realizados procedimentos de caracterização dos minerais e dos óleos. A segunda parte consistiu em ensaios de microflotação na célula de Fuerstenau. As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 exibem os procedimentos que foram realizados no trabalho.

Figura 4.1 — Fluxograma dos procedimentos da hematita.



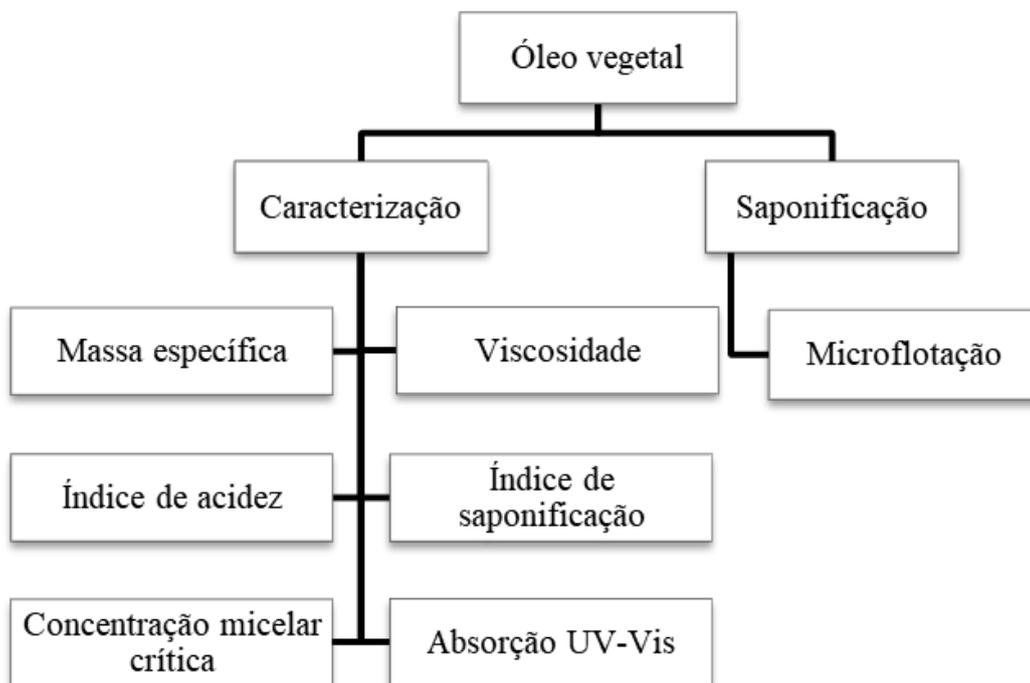
Fonte: autoria própria.

Figura 4.2 — Fluxograma dos procedimentos da dolomita.



Fonte: autoria própria.

Figura 4.3 — Fluxograma dos procedimentos com os óleos vegetais.



Fonte: autoria própria.

4.1 Preparo da hematita

Com intuito de aumentar a pureza do material hematítico, a amostra foi submetida à separação magnética a úmido através do equipamento separador magnético a úmido de alto gradiente, da Carpco, modelo 3X4L, no laboratório de Tratamento de Minérios (DEMIN/UFOP), sendo o concentrado magnético utilizado nos ensaios posteriores.

4.2 Preparo da dolomita

A adequação granulométrica do material foi realizada através do moinho de bolas, utilizando corpo moedor esférico de porcelana e a classificação foi realizada por peneiramento a úmido, utilizando as amostras cujos tamanhos se encontram entre 212 μm e 105 μm . Ambos os procedimentos foram executados no Laboratório de Tratamento de Minérios (DEMIN/UFOP).

4.3 Caracterização das amostras minerais

A distribuição granulométrica da hematita foi feita por peneiramento a úmido, utilizando a sequência Tyler a partir da peneira de malha 100 (148 μm), realizada no Laboratório de Tratamento de Minérios (DEMIN/UFOP).

A análise da distribuição granulométrica foi feita com o emprego do software Easyplot® e testando as equações de Harris, Gaudin-Meloy, Rosin-Rammler e Gates Gaudin-Schumann para verificar qual delas apresenta melhor aderência.

A decomposição térmica das amostras foi determinada por análise termogravimétrica (TG) e sua derivada (DTG) foi realizada através do analisador termográfico TGA Q50 da Thermal Analysis, no Laboratório de Espectroscopia Infravermelha e Termogravimetria (DEMIN/UFOP).

A composição mineralógica foi determinada através do difratômetro de raios X XPERT3 – PanAnalytical do Laboratório de Microscopia Ótica e Difractometria de Raios X (DEMIN/UFOP).

As massas específicas dos minerais foram obtidas através método do picnômetro a água de Gay–Lussac e os procedimentos para determinação das massas utilizadas no cálculo foram medidas baseadas no trabalho de Milhomem e Luz (2016). Primeiramente o picnômetro vazio foi pesado, depois adicionado a amostra de forma que ocupasse aproximadamente 33 % do volume do picnômetro e pesado. Depois o picnômetro foi preenchido com água, juntamente com a amostra e pesado. Por fim, o picnômetro foi esvaziado, preenchido com água e pesado.

As massas obtidas foram aplicadas na Equação 4.1, a fim de calcular a densidade relativa dos minerais.

$$d_s = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 + m_2) - (m_1 + m_3)} \quad (4.1)$$

Onde:

d_s – densidade do sólido;

m_1 - massa do picnômetro vazio (g);

m_2 - massa do picnômetro com minério (g);

m_3 - massa do picnômetro com minério e água (g);

m_4 - massa do picnômetro com água (g).

4.4 Caracterização dos óleos vegetais

Os óleos vegetais utilizados foram de semente de uva, caroço de algodão e crambe devido à pouca ou nenhuma pesquisa sobre eles como insumo da flotação. O óleo de semente de uva foi adquirido da Gran Oils S/A, o óleo de caroço de algodão da Siol Alimentos LTDA e o óleo de crambe da Soul Shaker.

A massa específica foi determinada através da pesagem de 5 mL do óleo em uma balança analítica, utilizando a relação entre massa e volume com a Equação 4.2:

$$\rho_{\text{óleo}} = \frac{m_{\text{óleo}}}{V_{\text{óleo}}} \quad (4.2)$$

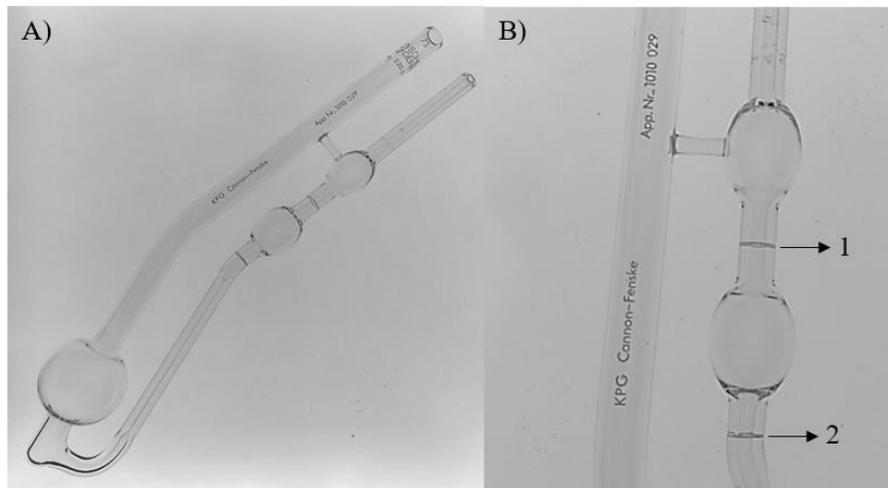
Onde:

$m_{\text{óleo}}$ - massa óleo (kg);

$V_{\text{óleo}}$ - volume do óleo (m³).

A viscosidade cinemática foi medida com o viscosímetro capilar de Ostwald (modelo Cannon-Fenske). Foi adicionado 10 mL do óleo no viscosímetro através do tubo de maior diâmetro e encaixado uma pera de borracha no tubo de menor diâmetro. O ar foi aspirado pela pera até a marca 1 e, ao atingir essa marcação, foi cronometrado o tempo que o líquido escoou do ponto 1 ao 2. A Figura 4.4 ilustra o viscosímetro e os pontos 1 e 2.

Figura 4.4 — A) Viscosímetro capilar de Ostwald e B) indicação dos pontos 1 e 2.



Fonte: autoria própria.

A viscosidade foi calculada através da Equação 4.3, fornecida pelo fabricante.

$$v = k \cdot t \quad (4.3)$$

Onde:

v – viscosidade cinemática (mm²/s);

k – constante característica do viscosímetro (–);

t – tempo (s).

O índice de acidez (IA) é a massa de hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH) necessária para neutralizar 1,00 g da amostra de óleo, sendo uma forma de avaliar o estado de conservação do mesmo (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008). Os procedimentos foram baseados no Instituto Adolfo Lutz (2008) e em Milhomem (2020).

Em um Erlenmeyer de 200 mL, foi pesado aproximadamente 1,00 g do óleo e adicionado 25 mL de etanol (álcool etílico absoluto) e duas gotas de fenolftaleína. Em uma bureta, foi adicionado uma solução de NaOH (0,1M) e a solução foi titulada, agitando-se vigorosamente o Erlenmeyer, até a cor rosa permanecer por 30s.

O índice de acidez foi calculado através da Equação 4.4.

$$IA = \frac{V_{NaOH} \cdot N_{NaOH} \cdot MM_{NaOH}}{m_{\acute{o}leo}} \quad (4.4)$$

Onde:

V_{NaOH} – volume de NaOH gasto na titulação (mL);

N_{NaOH} – concentração de NaOH (M);

MM_{NaOH} – massa molar do NaOH (g/mol);

$m_{\acute{o}leo}$ – massa do óleo (g).

O índice de saponificação (IS) é a quantidade de NaOH ou KOH necessário para saponificar uma quantidade definida de amostra, indicando a quantidade relativa de ácidos graxos de alta e baixa massa molecular. Os procedimentos foram baseados no Instituto Adolfo Lutz (2008) e em Milhomem (2020).

Em um Erlenmeyer de 200 mL, foi pesado aproximadamente 1g do óleo e adicionado 25mL de solução alcóolica de NaOH (4 % m/V). A solução foi aquecida em refluxo por 1h e após o resfriamento, foram adicionadas 2 gotas de fenolftaleína. A solução foi titulada com solução de HCl (0,5M), agitando-se vigorosamente o Erlenmeyer até a cor rosa desaparecer. Foi preparado um branco e seguiram-se os procedimentos anteriores, porém sem o aquecimento da amostra.

O índice de saponificação foi calculado através da Equação 4.5:

$$IS = \frac{N_{NaOH} \cdot (V_B - V_A) \cdot MM_{NaOH}}{m_{\acute{o}leo}} \quad (4.5)$$

Onde:

N_{NaOH} – concentração de NaOH (M);

MM_{NaOH} – massa molar do NaOH (g/mol);

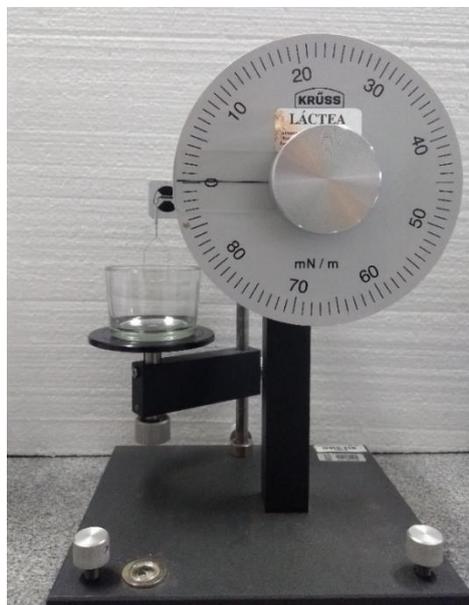
V_B – volume gasto na titulação do branco (mL);

V_A – volume gasto na titulação da amostra (mL);

$m_{\acute{o}leo}$ – massa do óleo (g).

A concentração micelar crítica (CMC) foi determinada através da medição da tensão superficial do óleo saponificado em diferentes concentrações. Foi utilizado o tensiômetro de força K6 da KRÜSS (medida de 0 a 90 mN/m), indicado na Figura 4.5, cujo funcionamento baseia-se do método do anel de Du Noüy. Os procedimentos abaixo foram baseados no manual da Krüss (KRÜSS, 2007).

Figura 4.5 — Tensiômetro de força.



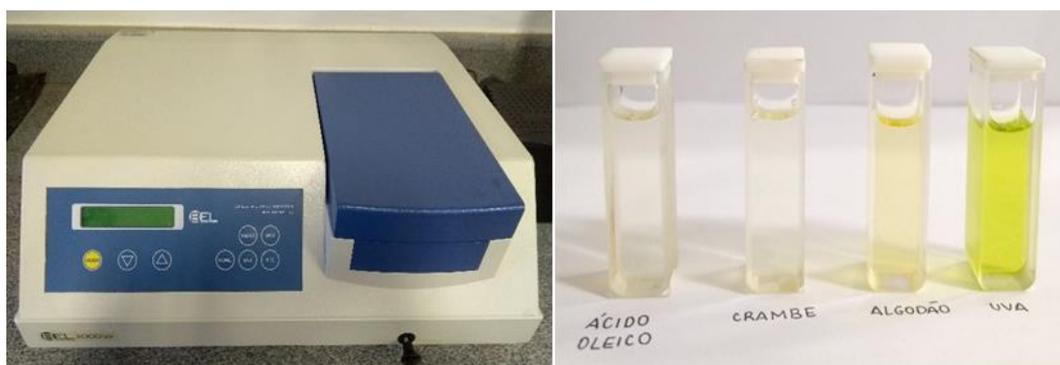
Fonte: autoria própria.

Primeiramente o dispositivo é nivelado para que todos os seus componentes estejam sujeitos às mesmas forças ao mesmo tempo. A plataforma onde se apoia o recipiente com

a solução foi elevada até a superfície do líquido encostar no anel de platina. O botão foi girado de modo extremamente vagaroso (para se evitarem efeitos inerciais), suspendendo o anel até que ocorria a ruptura no filme líquido, indicando o valor da tensão superficial. O mesmo procedimento foi realizado em duplicata para as concentrações 1,0; 2,0; 5,0; 10,0; 15,0; 20,0; 30,0; 40,0; 50,0; 60,0; 70,0; 80,0; 90,0; 100,0; 110,0; 120,0 e 150,0 mg/L. Considerando que a CMC é determinada através da constância do valor da tensão superficial, nos casos em que a tensão não atingisse um valor constante, a concentração da solução foi aumentada de 50,0 em 50,0 mg/L até se atingirem os valores necessários.

A espectroscopia no UV–visível dos óleos foram realizados no espectrofotômetro óptico da Bel Photonics modelo SP UV 2000, utilizando cubetas de quartzo de 1,00 cm de caminho óptico e volume de 5,0 mL, no Laboratório de Reologia e Petróleo (DEMIN/UFOP). O equipamento e as cubetas estão ilustrados na Figura 4.6.

Figura 4.6 — Espectrofotômetro e as cubetas com os óleos utilizados.



Fonte: autoria própria.

Foram realizadas leituras de absorvância do hexano PA, dos óleos puros e diluídos, na concentração de 7%, em hexano P.A. Para a realização da leitura, primeiramente o espectrofotômetro foi calibrado com uma amostra de hexano PA, aplicando 100 % de transmitância no comprimento de onda de 500 nm.

Após a calibração, foi feita uma varredura das absorvâncias entre os comprimentos de onda de 200 nm a 1000 nm, variando de 10 em 10 nm. Posteriormente gráficos de absorvância em relação ao comprimento de onda foram construídos.

4.5 Preparo dos insumos para os ensaios de microflotação

4.5.1 Solução-mãe de coletor

Primeiramente foi preparado uma solução-mãe de 0,1 % (m/V) para ser utilizada na microflotação seguindo a metodologia baseada no trabalho de Milhomem (2020).

Em um balão de 1L foi pesado 1g do óleo, adicionado 20 mL de solução alcóolica de NaOH (4 % m/V) e colocou em aquecimento com agitação magnética por aproximadamente 20 min. Foram adicionados 100 mL de água destilada e deixou em refluxo com um condensador de bolas por 1h. Posteriormente, a solução foi retirada e aquecida por mais 15 min, a fim de eliminar o restante do álcool da solução e, após o resfriamento da solução, o balão foi preenchido com água destilada.

4.5.2 Gelatinização do amido

O depressor utilizado foi o amido de mandioca, uma alternativa de insumo que apresenta alto potencial e, em alguns casos, exibe resultados mais satisfatórios que o amido de milho, que já é comumente aplicado. O amido de mandioca utilizado foi o polvilho doce da Amafil.

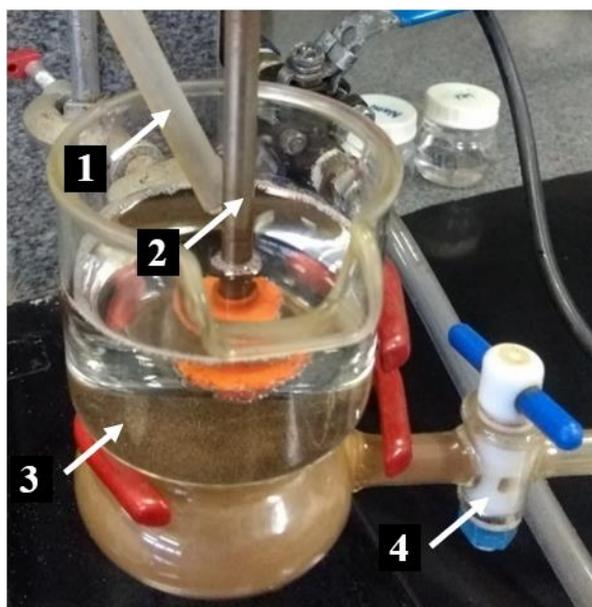
Foi preparado uma suspensão de amido de mandioca gelatinizado de 1 % (m/V) com relação amido/hidróxido de sódio 5/1, proporção escolhida baseada nos trabalhos de Silveira et. al (2013) e Souza e Magalhães (2016). O procedimento foi realizado seguindo a metodologia baseadas no trabalho de Moreira (2013).

Em um béquer de 1L, foi adicionado 50mL de água e acionou a agitação magnética. Foi pesado 5g de amido e adicionado aos poucos no béquer com água. Foi pesado 1g de hidróxido de sódio, adicionado no béquer juntamente com mais 50mL de água e a suspensão foi condicionada por mais 10 min. O processo foi realizado a quente por volta de 60°C. Após resfriamento, a suspensão foi transferida para um balão de 500mL e completado com água destilada.

4.6 Ensaios de microflotação

Todos os ensaios de microflotação foram realizados em duplicata, utilizando o óleo de pinho como espumante e gotejamento de água do reservatório (a qual tem a mesma proporção de espumante utilizado no ensaio), como mostra a Figura 4.7. A vazão do ar comprimido foi de $4,33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ (260 mL/min) e da água de reposição $1,42 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ (85 mL/min). Os procedimentos foram baseados em Milhomem (2020).

Figura 4.7 — Detalhe da célula de Fuerstenau (1 – torneira de reposição; 2 – impelidor mecânico; 3 – tampão poroso; 4 – torneira para injeção de gás).



Fonte: autoria própria.

4.6.1 Ensaios sem depressor e sem mistura de minerais

A fim de obter a janela de seletividade entre a hematita e dolomita, os testes foram realizados apenas com o coletor com concentração constante de 50 mg/L, com 12 g do mineral e nos pH 5; 6,1; 7,2; 8,3 e 9,4.

A solução de coletor foi preparada adicionando 5 mL da solução-mãe em 100 mL de água destilada e adicionada na célula, ajustado o pH até um valor próximo do desejado utilizando soluções de NaOH e HCl. O material foi adicionado e condicionado por 4 min enquanto foi feito o ajuste fino do pH. No fim do tempo de condicionamento, adicionou-se uma gota de espumante e deixou em condicionamento por mais um minuto. Após o condicionamento, o ar comprimido foi acionado e encaixado a mangueira da água de

reposição. O tempo começou a ser cronometrado quando o material começou a escoar e, enquanto o material escoava, foi feita a raspagem da espuma mineralizada a cada 5 s. Após 150 s de flotação, o procedimento foi encerrado e o material coletado foi filtrado, seco por 1 h a 120 °C e pesado.

4.6.2 Ensaios sem depressor e com mistura de minerais

Com o objetivo de observar o efeito da mistura dos minerais na microflotação, os testes foram realizados apenas com o coletor na concentração de 20mg/L em duplicata, com mistura dos minerais, sendo 12 g de cada, e nos pH 5; 6,1; 7,2; 8,3 e 9,4.

A solução de coletor foi preparada adicionando 2 mL da solução base em 100 mL de água destilada e adicionada na célula e ajustado o pH até um valor próximo do desejado utilizando soluções de NaOH e HCl. A mistura do material foi adicionada e condicionada por 4 min enquanto foi feito o ajuste fino do pH. Uma gota de espumante foi adicionada e a mistura condicionada por mais 1 min. Após o condicionamento, o ar comprimido foi acionado e encaixado a mangueira da água de reposição. O tempo começou a ser cronometrado quando o material começou a escoar e, enquanto o material escoava, foi feita a raspagem da espuma mineralizada a cada 5 s. Após 150 s de flotação, o procedimento foi encerrado e o material coletado foi filtrado, seco por 1 h a 120 °C e pesado.

Para determinar o teor dos minerais, as amostras foram submetidas aos seguintes métodos:

- Método da análise de imagens
- Método da densidade
- Método da perda de massa por calcinação

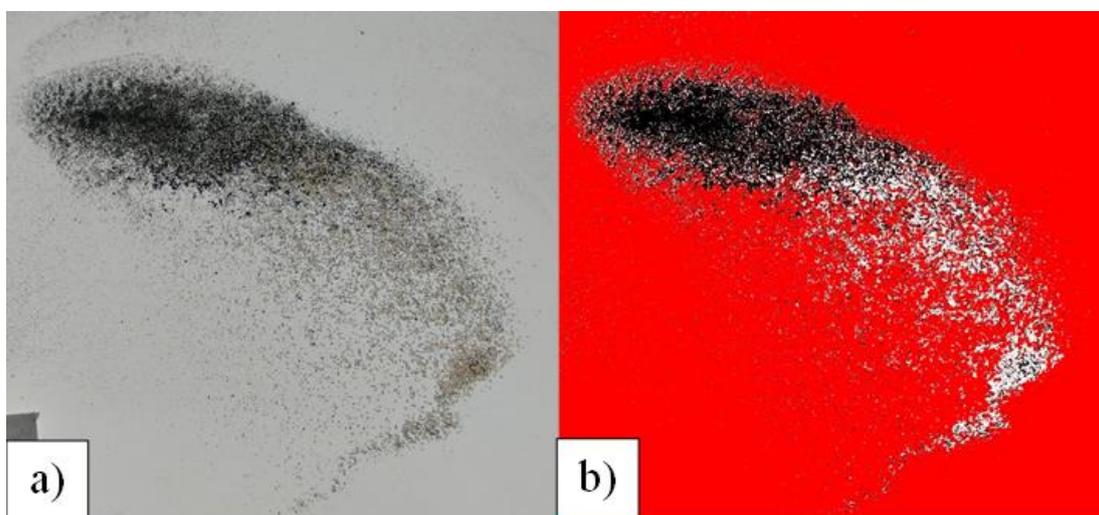
4.7 Análise de imagem

A quantificação dos teores por esse método consistiu na construção e análise de histogramas de pixels fornecidos pelo pacote computacional *IrfanView*®. O procedimento para essa metodologia foi baseado em Neuppmann (2019).

Primeiramente foram pesadas alíquotas de 0,1 g das amostras obtidas na microflotação em uma placa de Petri. Como as amostras contêm mistura binária, fez-se necessário a separação dos minerais para facilitar a análise das imagens. Para tal fim, foi utilizado uma mesa vibratória que, devido a diferença de densidade, fez com que as partículas de dolomita se separassem com mais facilidade. Após esse processo, foi realizado o espalhamento mais minucioso das partículas com leves toques na lateral da placa.

Posteriormente algumas fotos foram tiradas utilizando um smartphone e uma fonte de luz (mesa iluminada) para se evitar a formação de sombras nas imagens. A Figura 4.8 mostra um exemplo de dispersão das partículas na placa de Petri e imagem obtida após o tratamento das cores.

Figura 4.8 — a) dispersão da partícula na placa de Petri; b) imagem após tratamento.



Fonte: autoria própria.

Utilizando o pacote *IrfanView*®, o fundo da imagem foi transformado em vermelho, as partículas de hematita em preto e as de dolomita para pontos brancos. Foi gerado um histograma de pixels indicando a porcentagem das três cores. O teor de cada mineral foi calculado através da Equação 4.6:

$$t_{m1} = \frac{\%_{m1}}{\%_{m1} + \%_{m2}} \quad (4.6)$$

Onde

t_{m1} – teor do mineral 1;

$\%_{m1}$ – porcentagem do mineral 1 indicado no histograma;

$\%_{m2}$ – porcentagem do mineral 2 indicado no histograma.

4.8 Método da densidade

O teor de cada mineral foi determinado através da picnometria, cujo procedimentos já foram descritos anteriormente. Após a determinação da densidade do material, o teor de cada mineral foi calculado através da Equação 4.7:

$$t_{m1} = \frac{\rho_{m1}(\rho_T - \rho_{m2})}{\rho_T(\rho_{m1} - \rho_{m2})} \quad (4.7)$$

Onde:

t_{m1} – teor do mineral 1;

ρ_{m1} – densidade do mineral 1;

ρ_{m2} – densidade do mineral 2;

ρ_T – densidade total do picnômetro.

4.9 Método da perda de massa por calcinação

As amostras dos picnômetros foram despejadas em cadinhos devidamente etiquetados e o material ficou de repouso para que a amostra pudesse decantar. Posteriormente, o excesso de água foi retirado com uma seringa e os cadinhos foram levados à estufa para secagem do material. Depois foram colocadas na mufla e calcinadas a 900 °C por 3 horas. Assim que o tempo finalizou, a mufla foi desligada e as amostras foram pesadas após esfriarem. O teor de cada mineral foi calculado de acordo com a perda de massa do processo, utilizando as Equações 4.8, 4.9 e 4.10:

$$t_d = \frac{q - f_h}{f_d - f_h} \quad (4.8)$$

$$q = \frac{m_f}{m_i} \quad (4.9)$$

$$t_h = 1 - t_d \quad (4.10)$$

Onde:

t_d – teor da dolomita;

q – fração residual;

m_i – massa inicial antes da calcinação;

m_f – massa final após calcinação;

f_h – resíduo mássico da hematita no ensaio termogravimétrico;

f_d – resíduo mássico da dolomita no ensaio termogravimétrico;

t_h – teor da hematita.

Para determinar o teor de hematita, os resultados obtidos por cada método foram empregados em algoritmos para calcular a recuperação ajustada, gerando uma maior confiabilidade. Os procedimentos foram baseados em Luz (1999) e Neuppmann (2019).

Os dados foram aplicados em um algoritmo baseado nos multiplicadores de Lagrange (WILLS, 2006) com a inclusão de uma variável virtual, no caso, a escolhida foi o teor de hematita, resultante da adoção da recuperação mássica obtida pela simples pesagem dos

produtos. Sabendo-se que o teor efetivo da alimentação era de 50 %, e escolhendo-se o teor de hematita no concentrado igual ao obtido pela picnometria, calculava-se o valor do teor do rejeito que resultasse compatível com a conhecida recuperação mássica, em concordância com o preconizado por Luz (LUZ, 1999).

Com os resultados dos teores do flotado e não flotado de cada método, foram adotados valores de erro relativo da alimentação como 0,01 %, relacionado ao erro da balança, e 4 % para o concentrado e rejeito.

A recuperação mássica ajustada foi calculada pela Equação 4.11.

$$R_{mass} = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - r_i) \cdot (c_i - r_i)}{\sum_{i=1}^n (c_i - r_i)} \quad (4.11)$$

Onde:

R_{mass} – recuperação mássica ajustada;

a_i – teor da hematita na alimentação do método i ;

r_i – teor da hematita não flotada pelo método i ;

c_i – teor da hematita flotada pelo método i .

Em seguida, foram calculados os teores ajustados através da subtração dos teores brutos pelos valores de ajuste para a alimentação, flotado e não flotado que são obtidos através das Equações 4.12, 4.13 e 4.14.

$$\delta_a(i) = \frac{[a_i - R_{mass} \cdot c_i - (1 - R_{mass}) \cdot r_i]}{1 + R_{mass}^2 + (1 - R_{mass})^2} \quad (4.12)$$

$$\delta_c(i) = \frac{-\{R_{mass}[a_i - R_{mass} \cdot c_i - (1 - R_{mass}) \cdot r_i]\}}{1 + R_{mass}^2 + (1 - R_{mass})^2} \quad (4.13)$$

$$\delta_r(i) = \frac{-\{(1 - R_{mass})[a_i - R_{mass} \cdot c_i - (1 - R_{mass}) \cdot r_i]\}}{1 + R_{mass}^2 + (1 - R_{mass})^2} \quad (4.14)$$

Onde:

$\delta_a(i)$ – valor de ajuste da alimentação para o método i ;

$\delta_c(i)$ – valor de ajuste do flotado para o método i ;

$\delta_r(i)$ – valor de ajuste do não flotado para o método i .

4.10 Ensaio com depressor e mistura de minerais

Os testes foram realizados com concentrações de 50 mg/L de coletor e 3 mg/L de depressor. Todos os ensaios foram feitos com mistura dos minerais, sendo 12 g de cada.

Adicionou-se o volume de água na célula, descontando o volume das soluções de coletor e depressor. O volume adequado de depressor e a mistura do material foram adicionados e condicionados por 4 min. Foi adicionada o volume adequado de coletor e condicionou-se por mais 4 min enquanto foi feito o ajuste fino do pH utilizando soluções de NaOH e HCl. Após os 4 min, uma gota de espumante foi adicionada e a mistura condicionada por mais 1 min. Em seguida, o ar comprimido foi acionado e encaixado a mangueira da água de reposição e o tempo começou a ser cronometrado quando o material começou a escoar. Enquanto o material escoava, foi feita a raspagem da espuma mineralizada a cada 5 s. Após 150 s de flotação, o procedimento foi encerrado e o material coletado foi filtrado, Oseco por 1 h a 120 °C e pesado.

Para determinar os teores dos minerais flotados, foi utilizado o método da picnometria já descrito anteriormente.

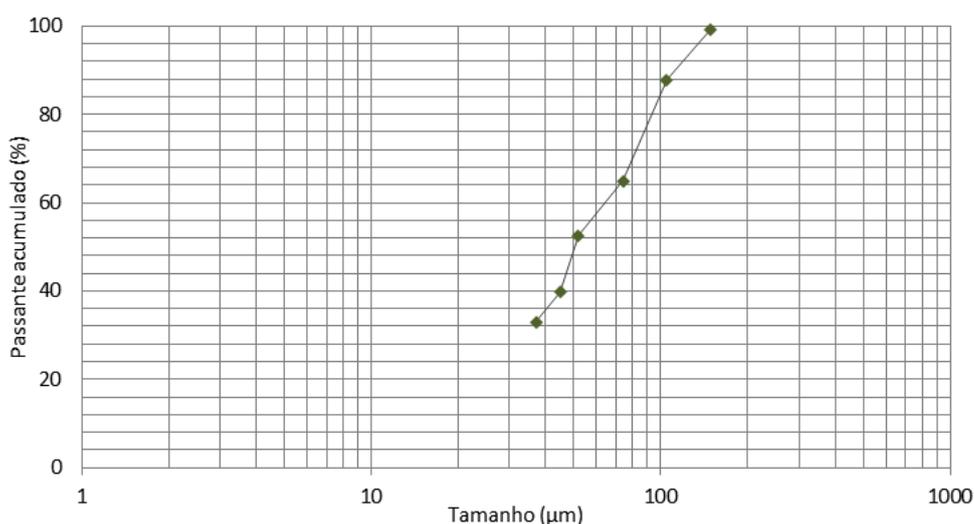
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das amostras minerais

5.1.1 Hematita

A massa específica da amostra fornecida pela picnometria foi de 4.570 kg/m³. De acordo com a distribuição granulométrica (Figura 5.1), a amostra apresentou em maior quantidade (32,96 %) de partículas finas, abaixo de 37 µm, seguido de 22,96 % das amostras de 89 µm e em menor quantidade (0,86 %) no tamanho 179 µm. O d80 foi de 76,08 µm, ou seja, 80 % da amostra se apresenta tamanho menor que 76,08 µm.

Figura 5.1 — Distribuição granulométrica da hematita.



Fonte: autoria própria.

Das quatro equações de distribuição analisadas, a equação de Harris apresentou maior adequação para os dados de tamanho de partícula com coeficiente de determinação (R^2) igual a 99,17% e agudez da distribuição (n) igual a 1,81 conforme a Tabela 5.1.

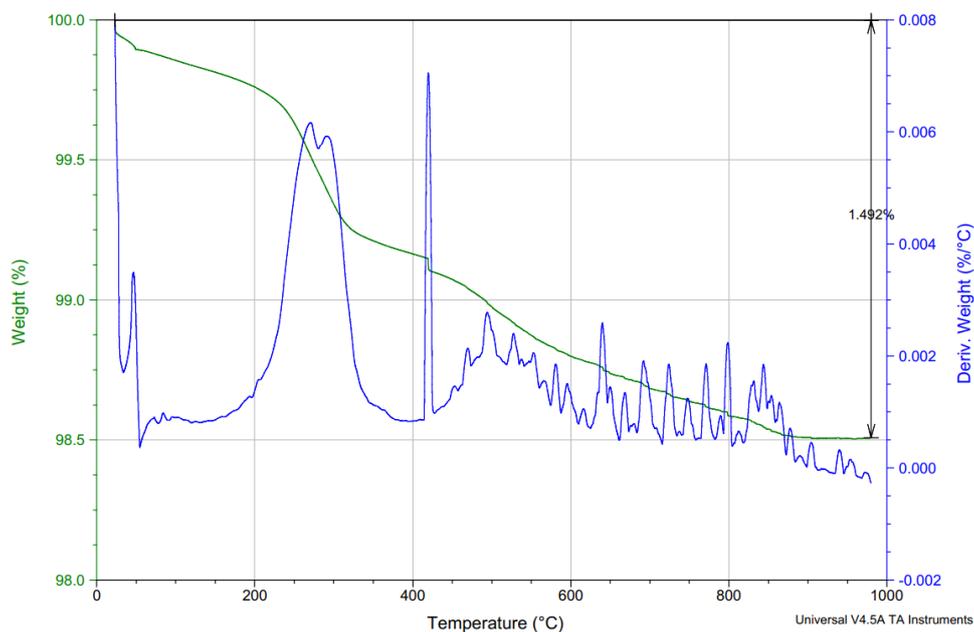
Tabela 5.1 — Parâmetros de caracterização granulométrica da hematita.

Distribuição de Harris		Gaudin-Meloy		Rosin-Rammler		Gates-Gaudin-Schumman	
n	R ²	n	R ²	n	R ²	n	R ²
1,8178	0,9917	1,5426	0,9882	1,6488	0,9582	0,6848	0,9563

Fonte: autoria própria.

A Figura 5.2 apresenta o termograma da hematita.

Figura 5.2 — Termograma da hematita.



Fonte: autoria própria.

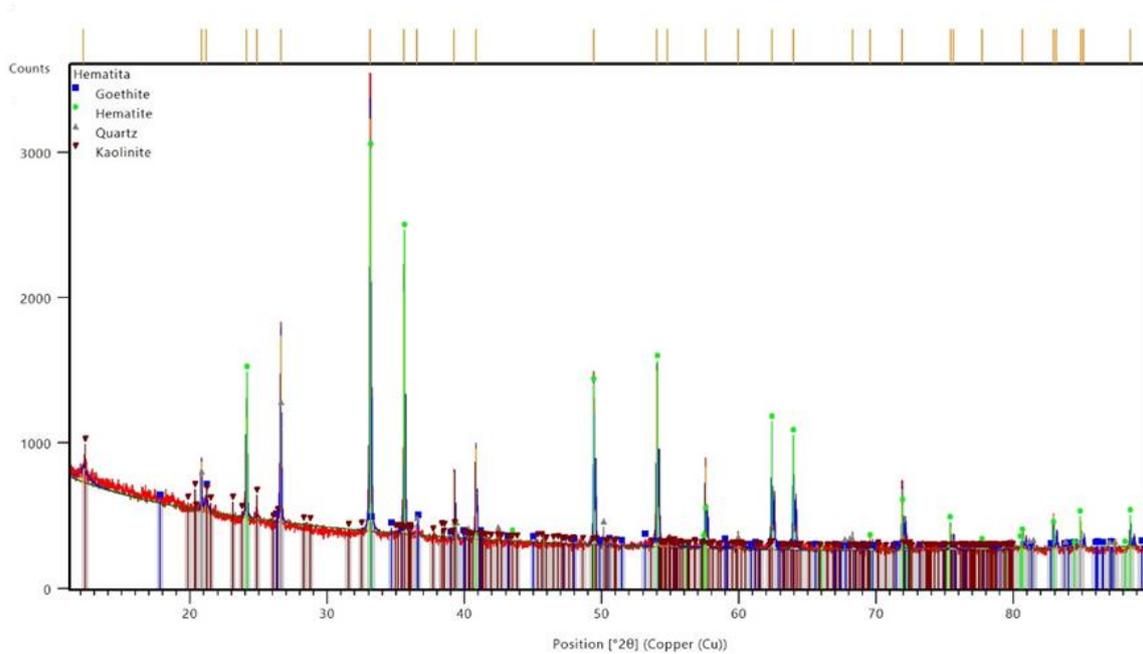
A curva de TG e DTG da hematita apresenta um processo de perda de massa, possivelmente relacionados à liberação de matéria volátil da amostra até aproximadamente 250°C, com perda de massa de aproximadamente 0,31%. A curva DTG apresenta dois picos associados a esse processo, nas temperaturas de 30°C e 50°C. Essa perda de massa pode corresponder a eliminação de água ligada fisicamente por forças de van der Waals e mantida por ligação de hidrogênio (ROCHA *et al.*, 2009; SOUZA *et al.*, 2020).

A partir de 250 °C inicia outra perda de massa de 0,56 % até 425 °C, com picos entre 275 °C e 300 °C e outro em 425 °C na curva de DTG. Esse decréscimo de massa correspondente a perda de hidroxila, o que indica a possível presença de goethita na amostra que, segundo Rocha (2008), Leonel (2011) e Salama *et al.* (2015), sua desidroxilação ocorre na faixa de 226 a 425 °C.

De acordo com Rocha (2008), a perda de massa na faixa de 500 a 600 °C pode estar relacionada a perda de hidroxilas de argilominerais, por conseguinte, a perda da hematita a partir de 425 °C pode estar relacionada a esse fenômeno.

A Figura 5.3 apresenta a composição mineralógica da amostra de minério de ferro através da difração de raios X e indicou a presença das seguintes fases minerais: goetita, hematita, quartzo e caulinita.

Figura 5.3 — Composição mineralógica da amostra de hematita.



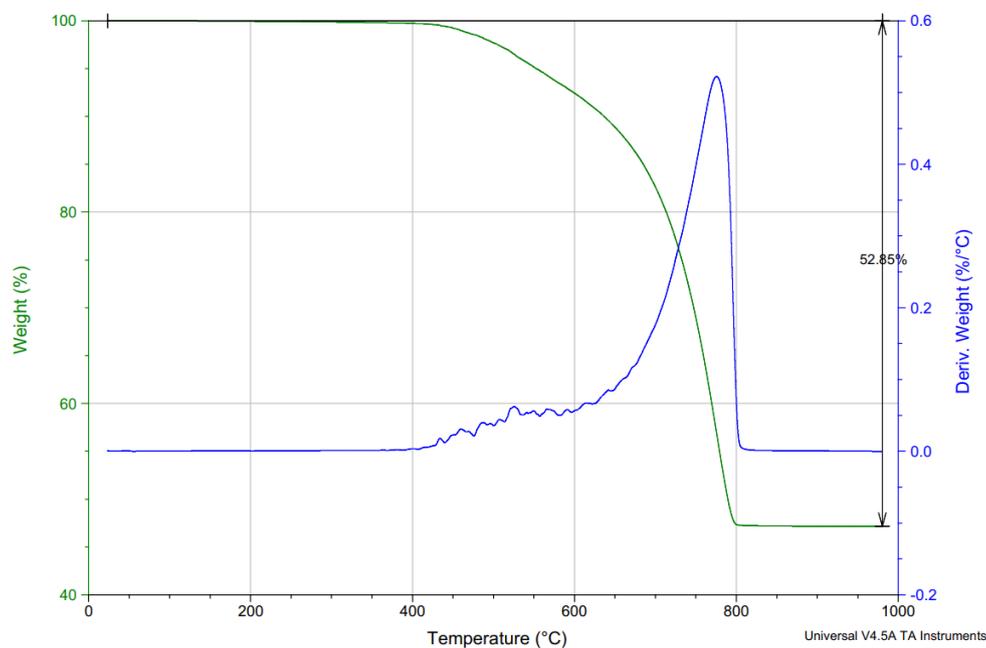
Fonte: autoria própria.

Observa-se maior presença de goethita na amostra (picos azuis) seguida de hematita (picos verdes). Esses resultados confirmam a análise do termograma em relação aos possíveis minerais encontrados na amostra e indicam a presença de quartzo na amostra.

5.1.2 Dolomita

A massa específica da amostra fornecida pela picnometria foi de 2.861 kg/m³. A Figura 5.4 apresenta o termograma da dolomita.

Figura 5.4 — Termograma da dolomita.



Fonte: autoria própria.

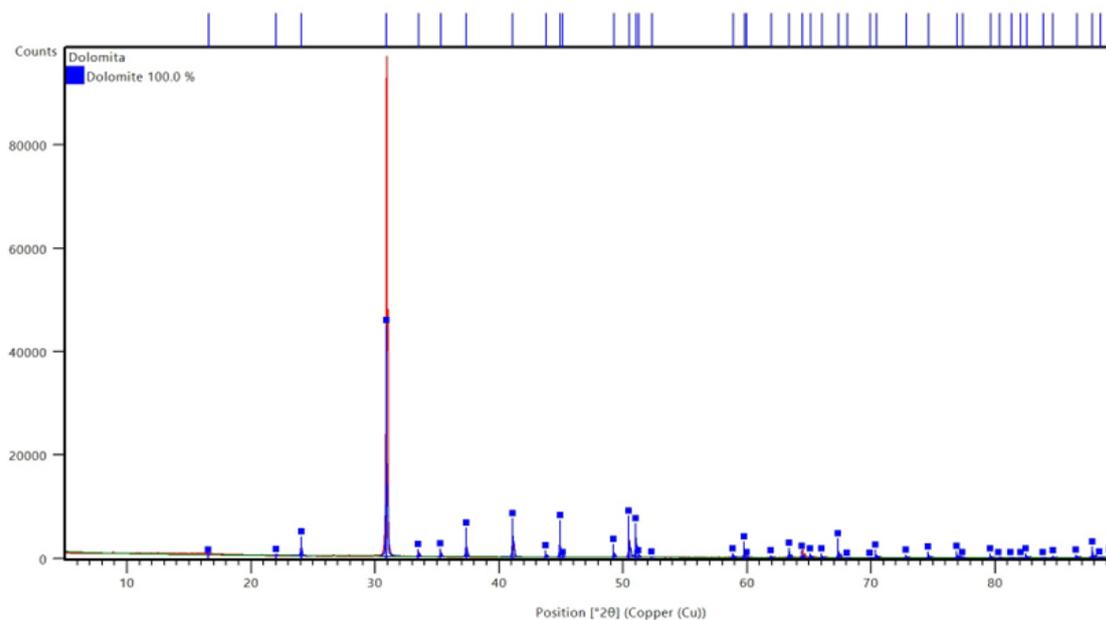
Segundo Millan et al. (2016), são esperadas duas perdas de massa em amostras de dolomita relacionadas à descarbonatação de seus constituintes, sendo a primeira de MgCO₃ entre 400 °C e 600 °C e a segunda de CaCO₃ entre 600 °C e 900 °C.

Durante o processo, pode ocorrer perda de água das hidroxilas em argilominerais que processa por volta de 485 °C, de acordo com Soares et al. (2014) e/ou na faixa de 500 °C a 600 °C, segundo Rocha (2008).

Esses fenômenos podem ser observados no gráfico, principalmente entre 600 °C e 800 °C, onde se encontra o maior pico na curva de DTG. Entre 400 °C e 600 °C há uma menor perda de massa, podendo estar relacionado a quantidade MgCO₃ presente na amostra ou até mesmo outros componentes, como os argilominerais. Todo o processo resultou em uma perda de massa total de 52,85 %.

A Figura 5.5 apresenta a composição mineralógica da amostra de dolomita e foi identificado apenas dolomita na amostra.

Figura 5.5 — Composição mineralógica da amostra de dolomita.



Fonte: autoria própria.

Apesar da análise do termograma indicar a possível presença de argilominerais, o DRX não confirmou essa suposição e como pode ser constatado pela presença de apenas um tipo de pico (azul), o material utilizado apresentou apenas a presença de dolomita.

5.2 Caracterização dos óleos

A Tabela 5.2 exibe os resultados da caracterização dos óleos e do ácido oleico dos ensaios de massa específica, viscosidade, índice de acidez e índice de saponificação.

Tabela 5.2 — Caracterização dos óleos utilizados.

Óleo	Massa específica (kg/m ³)	Viscosidade (mm ² /s)	Índice de acidez (mg NaOH/g amostra)	Índice de saponificação (mg NaOH/g amostra)
Ácido oleico	856	37,854	164,82	90,02
Semente de uva	874	72,183	1,375	266,045
Caroço de algodão	875	71,566	1,392	211,785
Crambe	851	168,62	2,2	114,851

Fonte: autoria própria.

Em relação as características dos óleos, o ácido oleico e crambe apresentaram massa específica próximas, assim como o óleo de semente de uva e caroço de algodão. Segundo Marques (2012), há uma correlação entre a viscosidade dos óleos e a composição em ácidos graxos. A viscosidade diminui com o aumento da quantidade de insaturações dos ácidos e aumenta com o comprimento da cadeia hidrocarbônica.

A Tabela 5.3 indica a composição com maior porcentagem dos óleos vegetais, de acordo com Firestone (2013).

Tabela 5.3 — Composição dos óleos vegetais.

Óleo	Ácido graxo e quantidade de carbonos	Quantidade (%)
Semente de uva	Linoleico (18:2)	40 – 78
Caroço de algodão	Indefinido (18:2)	53,3 – 61,6
Crambe	Erúcido (22:1)	47,7 – 60

Fonte: Firestone (2013) e Souza et al (1998).

O óleo de crambe apresentou maior viscosidade, podendo ser explicado pela sua composição de ácido graxo com cadeia mais longa (22 carbonos) entre os óleos. Os outros óleos possuem em maior quantidade ácido graxo com cadeia de 18 carbonos, logo, o que pode estar diferenciando a viscosidade entre eles é a quantidade presente na composição.

Apesar do ácido oleico apresentar menos insaturações que o linoleico, sua baixa viscosidade em relação aos outros pode ser explicada pela pureza do reagente. Os óleos de semente de uva e caroço de algodão apresentam valores de viscosidade muito próximos, o que pode ser justificado pela quantidade de ácido graxo que os constitui.

O índice de acidez fornece informação sobre o estado de conservação do óleo, cujo processo de decomposição altera a concentração dos íons hidrogênio. Também indica se os ácidos graxos estão livres e um valor baixo aponta a maior necessidade de saponificação do óleo. Esse processo pode ser acelerado por aquecimento ou incidência de luz na amostra, formando ácidos graxos livres (INSTITUTO ADOLF LUTZ, 2008, SANTOS et al., 2017). De acordo com os resultados, pode-se concluir que o ácido oleico apresenta elevada quantidade de ácidos graxos livres, sendo o óleo com o pior estado de conservação.

O índice de saponificação indica a quantidade de álcali (geralmente hidróxido de sódio ou de potássio) necessário para saponificar um grama de amostra de óleo ou gordura. Indica o tamanho relativo das cadeias hidrocarbônicas dos ácidos graxos, de tal modo que, ésteres de menor cadeia e, conseqüentemente, menor massa molecular, requerem maior quantidade de álcali para saponificação (INSTITUTO ADOLF LUTZ, 2008, MILHOMEM, 2020).

Isso pode ser observado nos resultados encontrados onde o ácido oleico apresenta menor valor de índice de saponificação. Em relação aos óleos vegetais, há uma certa discordância para o óleo de crambe, que apresenta o ácido graxo com maior cadeia hidrocarbônica, porém possui o segundo menor valor do índice. Nesse caso, e entre os outros óleos, o que pode estar causando a diferença é porcentagem dos ácidos graxos presentes, que poderia ser conferido com o método de cromatografia gasosa.

A concentração micelar crítica (CMC) dos coletores é um parâmetro significativo para definição da concentração dos reagentes na flotação, uma vez que a utilização de concentrações acima da CMC seria um gasto desnecessário de insumos para obter a mesma recuperação. As medidas de CMC encontram-se na Tabela 5.4. As curvas de tensão superficial encontram-se no Apêndice 2.

Tabela 5.4 — Concentração micelar crítica dos reagentes.

Óleo	CMC (mg/L)	Tensão superficial (mN/m)
Ácido oleico	200	34,1
Semente de uva	100	48,5
Caroço de algodão	90	48,6
Crambe	100	35,7

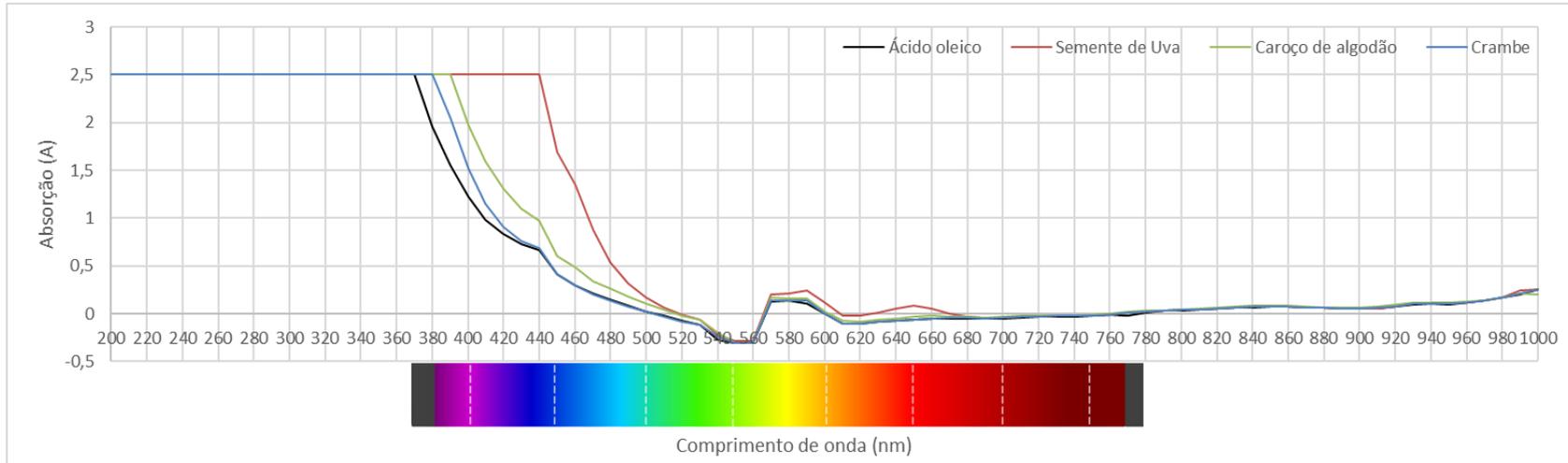
Fonte: autoria própria.

Visto que todos os coletores diminuíram a tensão superficial da água (72,7 mN/m), pode-se concluir que todos portam ação tensoativa. Segundo Costa (2012), cadeias hidrocarbônicas relativamente curtas não influenciam significativamente o decremento da tensão superficial, o que pode ser inferido para os óleos de semente de uva e caroço de algodão. O mesmo pode ser aplicado ao ácido oleico e o óleo de crambe, que apresentam ácidos graxos com longa cadeia hidrocarbônica e conseqüentemente tendem a diminuir mais a tensão superficial. Em relação aos valores, segue a dedução em relação a quantidade dos componentes dos reagentes, levando em conta que o ácido oleico é um reagente puro e o óleo de crambe apresenta uma variedade de ácidos graxos. Para a realização dos ensaios de microflotação não foram utilizadas concentrações de coletores acima dos valores de CMC obtidas.

A Figura 5.6 e 5.7 apresentam, respectivamente, a assinatura espectral dos óleos vegetais e ácido oleico puros e diluídos em hexano a 7 % (m/V). Pode-se observar um comportamento semelhante das curvas dos coletores, que pode estar relacionado a composição de cada um. Segundo Pantoja (2013) o ácido oleico apresenta banda característica em torno de 350 nm, porém o equipamento limita ao valor de absorção de 2,5; então não há como identificar essa banda e nem relacionar sua presença na composição dos óleos vegetais.

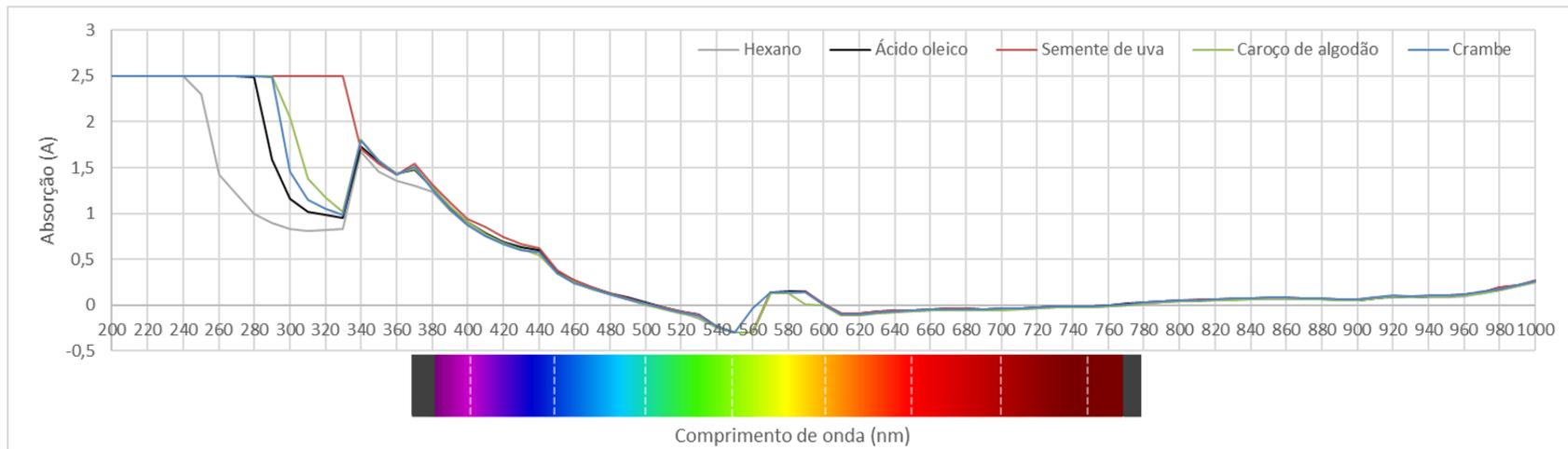
Quando diluídos, os insumos apresentaram curvas bem próximas a partir de 340 nm, com valores de absorção quase iguais. Devido a curva do hexano também estar bem alinhada a elas, esse efeito pode ser devido à alta diluição dos óleos, não marcando bem as diferenças entre os óleos e ácido oleico.

Figura 5.6 — Assinatura espectral dos óleos vegetais e ácido oleico puros.



Fonte: autoria própria.

Figura 5.7 — Assinatura espectral dos óleos vegetais e ácido oleico diluídos em hexano a 7 % (m/V).

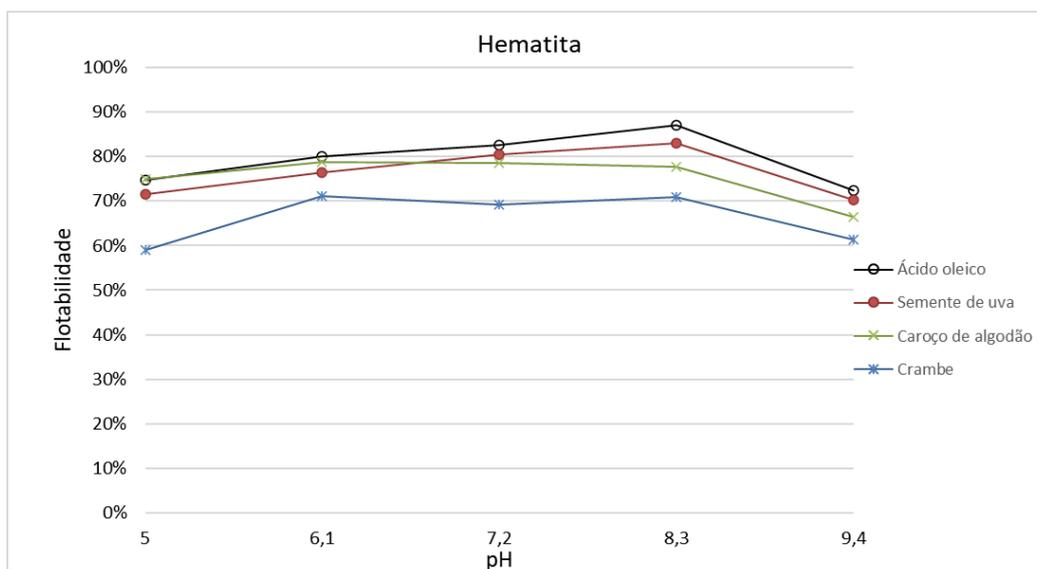


Fonte: autoria própria.

5.3 Ensaios de microflotação sem depressor e minerais separados

A Figura 5.8 apresenta a flotabilidade da hematita em concentração fixa de 50 mg/L e variando o pH.

Figura 5.8 — Flotabilidade da hematita em relação ao pH.



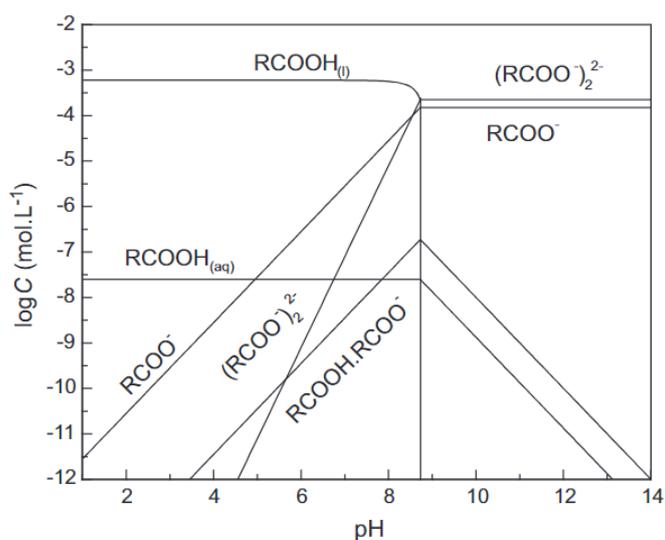
Fonte: autoria própria.

No geral os óleos apresentaram boa flotabilidade, entre 58,95 e 87,02 %, destacando o ácido oleico com 87,02 % e óleo de semente de uva 83,02 %, ambos no pH 8,3. Já o óleo de carozo de algodão e crambe, obtiveram maior flotabilidade no pH 6,1 com 78,72 % e 71,18 % respectivamente.

A adsorção do oleato na superfície da hematita é sensível à alteração do pH, apresentando flotabilidade máxima entre os pH 7 e 8 (KULKARNI; SAMASUNDARAN, 1980). Isso pode ser observado no gráfico onde a maior recuperação foi no pH 8,3 seguido do pH 7,2.

Segundo Milhomem (2020) esses tipos de coletores tendem a formar dímero ionomolecular no pH 8, possuindo alta atividade superficial e hidrofobizante. A Figura 5.9 indica a distribuição de espécies do ácido oleico, onde pode ser verificado a formação do dímero por volta do pH 4,5 atingindo a máxima entre os pH 8 e 9.

Figura 5.9 — Distribuição de espécies do ácido oleico.

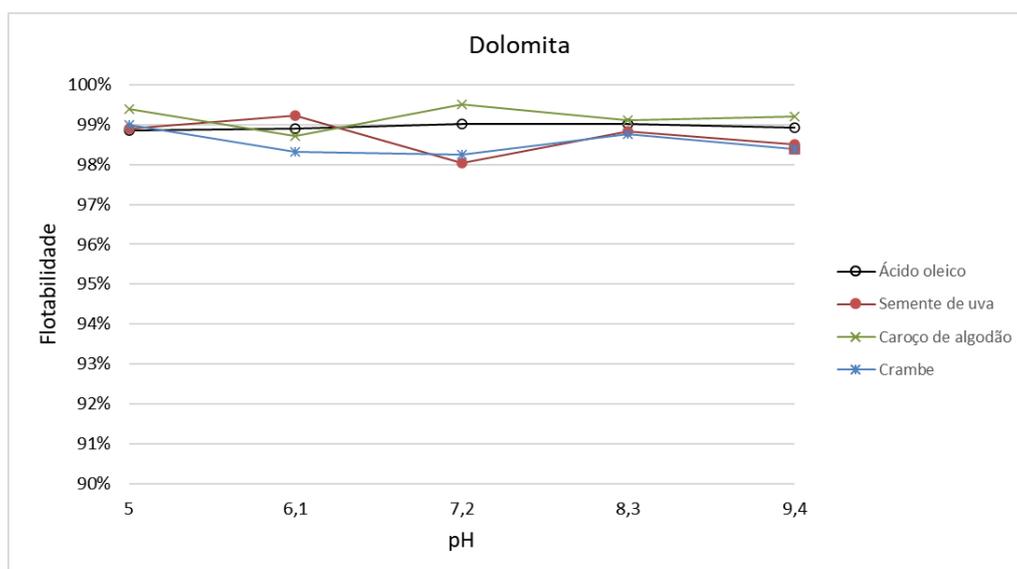


Fonte: Yu et al., 2015.

Para todos os coletores, há uma tendência na redução da flotabilidade da hematita em condições alcalinas. Essa queda pode estar associada ao aumento da competição entre os carboxilatos e hidroxilas pelos sítios superficiais da hematita (QUAST, 1999 *apud* RASO, 2018).

A Figura 5.10 apresenta a flotabilidade da dolomita em concentração fixa de 50 mg/L e variando o pH.

Figura 5.10 — Flotabilidade da dolomita em relação ao pH.



Fonte: autoria própria.

Em relação a dolomita, todos os óleos obtiveram alta flotabilidade, entre 98,03 % e 99,51 %, destacando o óleo de caroço de algodão no pH 7,2.

Para a dolomita em solução, as concentrações das espécies Mg^{2+} e Ca^{2+} prevalecem no pH 6, o que propicia a adsorção do coletor em sua superfície aumentando a flotabilidade do mineral (CHEN; TAO, 2004). Apesar disso poder ser observado no gráfico, os outros pH também obtiveram alta flotabilidade que é possível estar associado à característica floculante dos coletores. A Figura 5.11 exemplifica os flocos formados no processo, que ocorreu para todos os óleos em todos os pH.

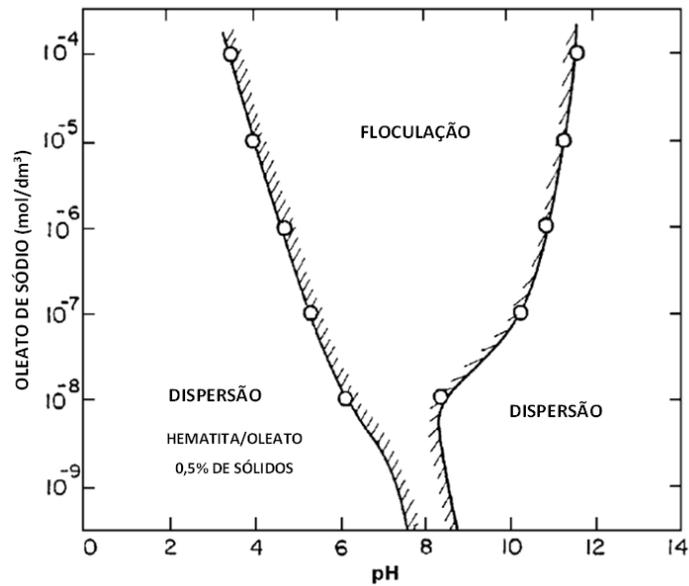
Figura 5.11 — Flocos de dolomita formados no processo de microflotação.



Fonte: autoria própria.

Segundo Shibata e Fuerstenau (2003), o oleato de sódio pode atuar como floculante em uma ampla faixa de pH dependendo da sua concentração. Conforme a Figura 5.12, o aumento da concentração do oleato resulta na ampliação da faixa de pH para a floculação. Essa relação pode ser aplicada aos óleos vegetais, uma vez que manifestaram o mesmo comportamento, sendo possível a presença de ácido oleico na composição.

Figura 5.12 — Relação entre pH e estados de dispersão e floculação.



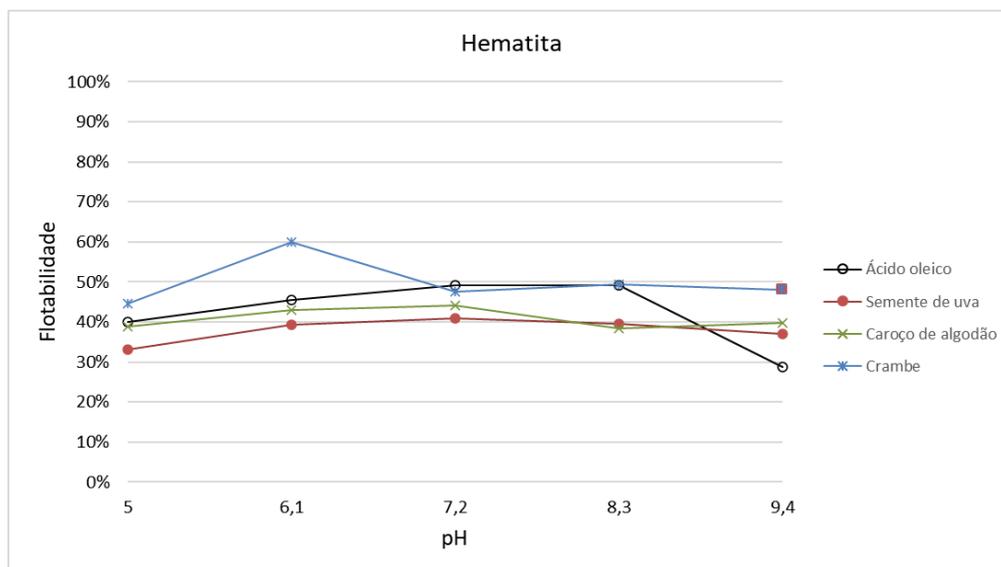
Fonte: Shibata e Fuerstenau (2003).

Conforme os resultados dos ensaios de flotabilidade, nota-se maior afinidade dos coletores com a dolomita do que a hematita. Os próximos ensaios de microflotação foram realizados a fim de averiguar se esse comportamento se manteria em uma mistura binária com os minerais.

5.4 Ensaios de microflotação sem depressor e com mistura sintética

As curvas dos teores flotados de hematita ajustados pelo algoritmo de reconciliação de dados por multiplicadores de Lagrange estão apresentadas na Figura 5.13.

Figura 5.13 — Teor de hematita flotado.



Fonte: autoria própria.

No geral, os resultados desse sistema indicaram a preferência dos coletores em adsorverem na superfície da dolomita considerando que os valores dos teores da hematita se concentraram na faixa de 40 a 50 %.

Nos resultados do ácido oleico podemos destacar o pH 9,4, onde ocorreu a menor recuperação da hematita (28,83 %) seguido do pH 5 (39,94 %), indicando uma possível janela de seletividade entre os minerais. O óleo de caroço de algodão apresenta menor recuperação de hematita no pH 8,3 (38,33 %) e no pH 5 (38,96 %). Em relação ao óleo de semente de uva a menor recuperação da hematita ocorreu no pH 5 com 33,14 %. O óleo de crambe exibiu um comportamento diferente dos outros óleos, com tendência a recuperação da hematita, principalmente no pH 6,1 com 59,94 %.

A Tabela 5.5 apresenta os resultados de recuperação metalúrgica (RM) e Índice de Seletividade de Gaudin (IS).

Tabela 5.5 — Recuperação metalúrgica (RM) e índice de seletividade (IS) da hematita no flotado.

pH	Ácido oleico		Semente de uva		Caroço de algodão		Crambe	
	RM	IS	RM	IS	RM	IS	RM	IS
5	38,79%	0,67	36,01%	0,50	51,43%	0,64	18,58%	0,81
6,1	44,25%	0,84	42,17%	0,65	53,26%	0,75	51,03%	1,50
7,2	39,39%	0,97	44,09%	0,69	40,96%	0,79	19,24%	0,91
8,3	46,93%	0,97	39,99%	0,66	30,03%	0,62	35,02%	0,97
9,4	32,88%	0,41	47,82%	0,59	39,71%	0,66	17,20%	0,93

Fonte: autoria própria.

De acordo com os dados da tabela, o melhor resultado para a hematita é no pH 6,1 para o óleo de crambe, com recuperação metalúrgica de 58,68 % e índice de seletividade de 1,44. No entanto as outras condições obtiveram índices de seletividade para a recuperação de hematita abaixo de 1. Considerando os valores desse índice e a tendência das curvas do teor de hematita flotado, o processo indica ser uma flotação aniônica reversa. Caso o sistema for considerado uma flotação aniônica reversa, os valores de recuperação metalúrgica e índice de seletividade para a hematita tendem a aumentar, como pode ser observado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 — Recuperação metalúrgica (RM) e índice de seletividade (IS) da hematita no afundado.

pH	Ácido oleico		Semente de uva		Caroço de algodão		Crambe	
	RM	IS	RM	IS	RM	IS	RM	IS
5	61,21%	1,50	63,99%	2,02	48,57%	1,57	81,42%	1,24
6,1	55,75%	1,19	57,83%	1,54	46,74%	1,33	48,97%	0,67
7,2	60,61%	1,03	55,91%	1,45	59,04%	1,26	80,76%	1,10
8,3	53,07%	1,03	60,01%	1,53	69,97%	1,61	64,98%	1,03
9,4	67,12%	2,47	52,18%	1,71	60,29%	1,51	82,80%	1,08

Fonte: autoria própria.

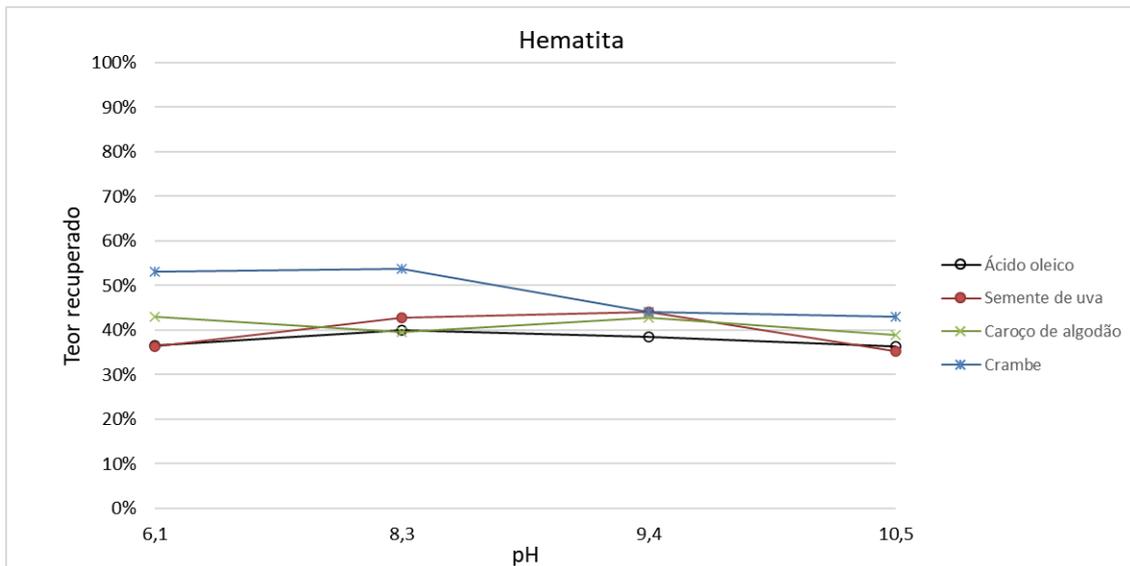
5.5 Ensaios de microflotação com depressor e mistura sintética

Nessa etapa, as condições de pH foram alteradas visando ao aumento da seletividade entre os minerais com a utilização do coletor.

Estudos feitos por Lopes (2013), a dolomita com Hidrocol apresentou alta flotabilidade em toda faixa de pH analisada, de ácido a alcalino. Com o ácido oleico, sua flotabilidade foi melhor em pH alcalino, principalmente no pH 10. Os resultados entrados por Raso (2018) na flotação de dolomita indicaram alta flotabilidade com óleo de soja no pH 6 e no pH 8 para o ácido oleico. Segundo os estudos de Raso, Lameiras, Albuquerque (2019), o amido de milho deprime preferencialmente a hematita em condições alcalinas e ensaios de bancada revelaram melhor resultado em pH 10,5.

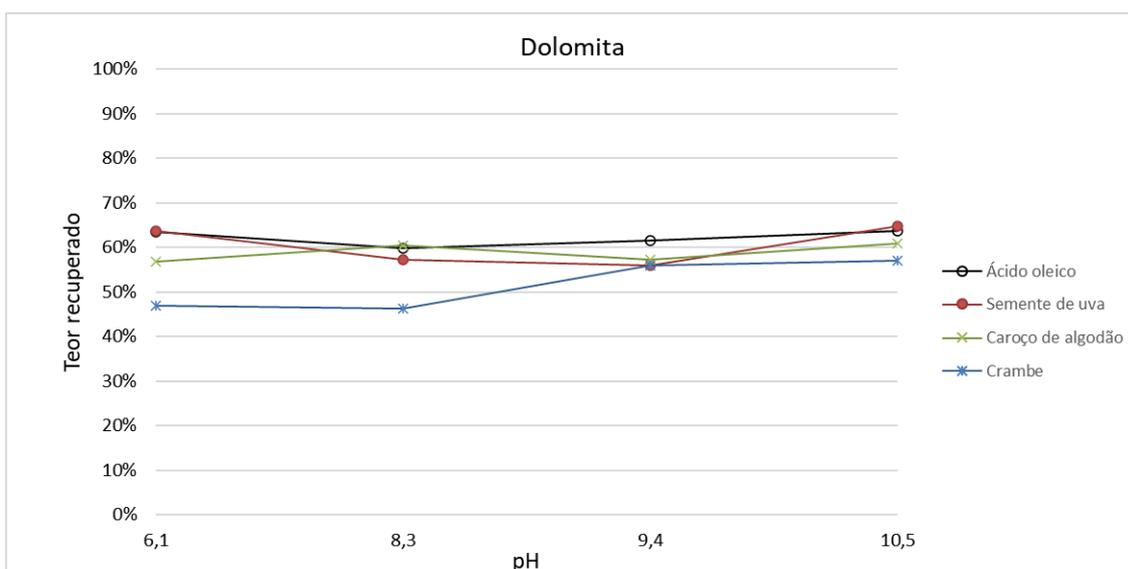
Tendo isso em vista, os valores de pH utilizados foram de 6,1; 8,3; 9,4 e 10,5, com apenas um pH na faixa ácida, para se ter um vislumbre do comportamento dos minerais nessa condição. Os resultados obtidos estão apresentados na Figuras 5.14 e 5.15.

Figura 5.14 — Teor de hematita no flotado.



Fonte: autoria própria.

Figura 5.15 — Teor de dolomita no flotado.



Fonte: autoria própria.

O ácido oleico e óleo de semente de uva apresentaram resultados quase semelhantes no pH 6,1 e pH 10,5, com recuperação metalúrgica aproximada de 64 % de dolomita e 36 % de hematita. O óleo de caroço de algodão apresentou resultados semelhantes no pH 8,3 e 10,5, com recuperação de aproximadamente 60 % de dolomita e 40 % de hematita. A melhor condição para o óleo de crambe foi no pH 10,5, com aproximadamente 57 % de dolomita e 43 % de hematita.

A Tabela 5.7 e 5.8 apresentam a recuperação metalúrgica (RM) e os índices de seletividade de Gaudin (IS) da microflotação com depressor.

Tabela 5.7 — Recuperação metalúrgica e índice de seletividade da hematita no flotado com depressor.

pH	Ácido oleico		Semente de uva		Caroço de algodão		Crambe	
	RM	IS	RM	IS	RM	IS	RM	IS
6,1	36,56%	0,58	36,23%	0,57	43,09%	0,76	53,02%	1,13
8,3	40,07%	0,67	42,85%	0,75	39,52%	0,65	53,72%	1,16
9,4	38,40%	0,62	44,09%	0,79	42,75%	0,75	44,08%	0,79
10,5	36,28%	0,57	35,26%	0,54	39,01%	0,64	42,94%	0,75

Fonte: autoria própria.

Tabela 5.8 — Recuperação metalúrgica e índice de seletividade da hematita no afundado com depressor.

pH	Ácido oleico		Semente de uva		Caroço de algodão		Crambe	
	RM	IS	RM	IS	RM	IS	RM	IS
6,1	63,44%	1,74	63,77%	1,76	56,91%	1,32	46,98%	0,89
8,3	59,93%	1,50	57,15%	1,33	60,48%	1,53	46,28%	0,86
9,4	61,60%	1,60	55,91%	1,27	57,25%	1,34	55,92%	1,27
10,5	63,72%	1,76	64,74%	1,84	60,99%	1,56	57,06%	1,33

Fonte: autoria própria.

Os resultados dessa etapa não apresentaram uma melhora significativa na recuperação metalúrgica no afundado e em algumas condições houve a diminuição dessa recuperação. Apesar do amido ser um depressor de hematita, pode-se observar sua forte tendência a adsorver na superfície da dolomita e atuar como depressor do mineral. Os valores não descartam o potencial dos óleos vegetais empregados nos ensaios como coletores, considerando que os resultados adversos apontam serem consequências do depressor utilizado.

Deve-se enfatizar que, em campanha de microflotação, a recuperação metalúrgica máxima não é o objetivo primário, mas sim a detecção de janelas de seletividade. Assim, a otimização da separação com máxima recuperação, deve ser objetivo a ser perseguido na etapa posterior do desenvolvimento do processo, usualmente na fase de flotação em bancada, empregando amostra de minério representativo (etapa essa que fugiu do escopo do presente trabalho).

6 CONCLUSÃO

- No sistema simplificado com 50 mg/L de coletor, todos os óleos apresentaram alta flotabilidade para ambos os minerais. A melhor flotabilidade para a hematita foi no pH 8,3, com 87,02 % para o ácido oleico e 83,02 % para o óleo de semente de uva. Em relação a dolomita, todos os óleos apresentaram resultados próximos a 100 %. Isso pode estar ligado a formação de flocos de dolomita durante o processo e a tendência dos coletores a adsorverem em sua superfície em detrimento da hematita.
- No sistema binário com apenas coletor com 20 mg/L, o óleo de crambe apresentou maior recuperação de hematita no processo (59,94 %), com recuperação metalúrgica de 51,03 % e índice de seletividade de 1,5. Porém os outros sistemas obtiveram resultados opostos, com menor índice de seletividade e recuperação da hematita, de um modo geral, nos pH 5 e pH 9,4. Levando em consideração esses resultados e a recuperação de hematita no flotado, pode-se concluir que o sistema se trata de uma flotação reversa.
- No sistema binário com depressor, o ácido oleico e o óleo de semente de uva apresentaram melhor seletividade, ambos com aproximadamente 64 % de dolomita e 36 % de hematita no pH 6,1 e 10,5. Apesar da adição de depressor no processo, os resultados não obtiveram melhora significativa na seletividade em relação ao sistema com apenas coletor, indicando alta influência do amido na flotação da dolomita.
- Mesmo com os resultados baixos de seletividade, de um modo geral, a dolomita apresenta boa recuperação em todos os valores de pH, porém com propensão a flotar em pH alcalino e a hematita em pH próximo do neutro, variando entre pH 6,1 e pH 8,3.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ficam como sugestões para trabalhos a serem realizados no futuro:

- Realizar ensaios de microflotação com diferentes concentrações dos reagentes e com mistura binária;
- Verificar a seletividade do sistema na flotação reversa do minério de ferro com outros tipos de depressores;
- Campanha experimental em escala de bancada e em coluna piloto, para fazer o escalonamento das variáveis de processo aqui utilizadas;
- Verificação do comportamento dos reagentes utilizados com minérios reais.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M. A. M. **Clatratos na flotação catiônica reversa de minérios de ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2014.

AKBARI, S.; ABDURAHMAN, N. H.; YUNUS, R. M.; FAYAZ, F.; ALARA, O. R. Biosurfactants - a new frontier for social and environmental safety: a -mini review. **Biotechnology Research and Innovation**. p. 81 – 90, 2018.

ARAÚJO, A. C. et al. Flotação de minérios de ferro. *In*: CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Flotação, o estado da arte no Brasil (Volume 4)**. 3. ed. São Paulo: Signus. p. 317–330, 2006.

ARAÚJO, A. C.; VIANA, P. R. M.; PERES, A. E. C. Reagents in iron ores flotation. **Minerals Engineering**, v. 18, n. 2 SPEC. ISS., p. 219–224, 2005.

BRANDÃO, P. R. G.; CAIRES, L. G.; QUEIROZ, D. S. B. Vegetable lipid oil-based collectors in the flotation of apatite ores. **Minerals Engineering**. v.7, n. 7, p. 917 - 925, 1994.

CAIRES, L. G. **Óleos vegetais como matérias-primas para coletores**. 1992. 251 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, 1992.

CAMPOS, A. R.; LUZ, A. B.; BASTOS, F. F.; NOGUEIRA, I. Calcinação. *In*: Tratamento de minérios, ed: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A., 6ª edição, CETEM, Rio de Janeiro, p. 727 – 752, 2018.

CHEN, G.; TAO, D. Effect of solution chemistry on flotability of magnesite and dolomite. **International Journal of Mineral Processing**. v. 74, n. 1-4, p. 343-357, 2004.

CORRÊA, M. I. **Ação depressora de polissacarídeos e proteínas na flotação reversa de minérios de ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1994.

- COSTA, D. S. **Uso de óleos vegetais amazônicos na flotação de minérios fosfáticos**. 2012. 167 p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- COSTA, J. L. **Seletividade na flotação de minérios ferríferos dolomíticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.
- ERHAN, S. Z. Industrial uses of vegetable oils. Champaign, Illinois: American Oil Chemists' Society, 2005.
- FIRESTONE, D. Physical and Chemical Characteristics of Oils, Fats and Waxes. 3 ed. AOCS, 2013.
- HADZERIGA, P., GIANNINI, R. A. Amidos como reagente na indústria mineral - pequena revisão. *In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, 13, 1988, São Paulo, APEMI, p. 1031-1045, 1988.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz. Métodos físico-químicos para análises de alimentos. 4ª ed. (1ª Edição digital), 2008.
- JORGE, N. Química e tecnologia de óleos vegetais. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2009.
- KRÜSS. Krüss School Tensiometer K6. Hamburg: Krüss. 2007. 14 p
- KULKARNI, R. D.; SOMASUNDARAN, P. Flotation chemistry of hematite/oleate system. **Colloids and Surfaces**, v. 1, p. 387–405, 1980.
- LEJA, J. Surface Chemistry of Froth Flotation. Plenum Press, New York, 1982.
- LELIS, D.F. **Influência dos cátions Ca²⁺, Mg²⁺ e Mn²⁺ na flotação catiônica de minério de ferro**. 2014. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.
- LEONEL, C. M. L. **Estudo de Processo de Calcinação como Operação Unitária Adicional na Pelotização de Minérios de Ferro com Altos Valores de PPC**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

- LOPES, G. M. **Coletores potencialmente seletivos na separação de apatita, calcita e dolomita**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 165. 2013.
- LOPES, G. M.; LIMA, R. M. F. Flotação direta de minério de ferro com oleato de sódio. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 62, n. 3, p. 323-329, 2009.
- LUO, X.; WANG, Y.; WEN, S.; MA, M.; SUN, C.; YIN, W.; MA, Y. Effect of carbonate minerals on quartz flotation behavior under conditions of reverse anionic flotation of iron ores. **International Journal of Mineral Processing**, v. 152, p. 1–6, 2016.
- LUZ, J. A. M. **Flotação Aniônica de Rejeito Itabirítico: Estudo de Reagentes Alternativos e Modelamento Polifásico do Processo**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1996.
- LUZ, J. A. M. Flotation of iron ore. *In*: COLÁS, R.; TOTTEN, G. E. Encyclopedia of iron, steel, and their alloys. Boca Raton: CRC Press, p. 1249 – 1288, 2016.
- LUZ, J. A. M. Uso de vazões na compatibilização de teores via multiplicadores de Lagrange. **Revista Escola de Minas - REM**, v.5, n. 4, p. 269-274. 1999.
- MA, M. Froth Flotation of iron ores. **International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing**, v. 1, n. 2, p. 56–61, 2012.
- MARQUES, A. **Estudo do efeito da adição de diésteres em fluidos industriais de origem vegetal e suas propriedades**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.
- MELO, C. V; ARAÚJO, A. C.; FILIPPOV, L. O. Reverse cationic flotation of iron ores with complex silicate gangue minerals. *In: Iron ore conference*. Perth, Australia, 2017.
- MILHOMEM, F. O. **Cinética de flotação no sistema hematita e quartzo com uso de óleos vegetais**. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.
- MILHOMEM, F. O; LUZ, J. A. M. Colorimetric Image Analysis for Hematite Grade Estimation. **Journal of Materials Education**, 40, 155-162, 2018.

MILHOMEM, F. O; LUZ, J. A. M. Experimentos simples para estudos de graneis. **Holos**, 3, 114 – 131, 2016.

MILLAN, N. M. *et al.* Associação dos resultados de análise térmica e análise química de amostra de dolomita natural. *In: X Congresso Brasileiro e IV Congresso Pan Americano de análise térmica e calorimetria.* São Paulo, Brasil, 2016.

MOREIRA, W. R. **Fontes de amido aplicáveis à flotação de minério de ferro.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

NEUPPMANN, P. H. **Enriquecimento de finos hematíticos via flotação por carreador.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

NUNES, C. A. Tecnologia de Óleos e Gorduras para Engenharia de Alimentos. Lavras: Editora UFLA, 2013 (Texto acadêmico).

OLIVEIRA, J. A. **Grau de saponificação de poleos vegetais na flotação seletiva de apatita e de minério carbonático.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 201. 2005.

OLIVEIRA, J. A.; LUZ, J. A. M.; FERREIRA, E. E. Grau de saponificação de óleos vegetais na flotação seletiva de apatita de minério de ferro. **REM: Revista Escola de Minas.** v. 59, n. 4, p. 385-90, 2006.

PANTOJA, N. V. **Caracterização físico-química e espectroscópica do óleo de Tucumã (*Astrocaryum aculeatum* Meyer) visando aplicações nanobiotecnológicas.** Dissertação (Mestrado *Stricto Sensu* em Ciências) – Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2013.

PAVLOVIC, S.; BRANDAO, P. R. G. Adsorption of starch, amylose, amylopectin and glucose monomer and their effect on the flotation of hematite and quartz. **Minerals Engineering**, v. 16, n. 11, p. 1117–1122, 2003.

PERES, A. E. C.; CORREA, M. I. Depression of iron oxides with corn starches. **Minerals Engineering**, v. 9, n. 12, p. 1227–1234, 1996.

PERES, A.E.C., ARAÚJO, A.A. A flotação como operação unitária no tratamento de minérios. *In: CHAVES, A. P. (org.) Teoria e prática do tratamento de minérios: a flotação no Brasil*. Signus. V.4, 2ª ed., 484p., São Paulo, 2009.

RASO, E. F. **Rota de processo para concentração de minério de ferro dolomítico, da mina de Conceição – MG**. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Belo Horizonte, p. 165. 2018.

RASO, E. F.; LAMEIRAS, F. S.; ALBUQUERQUE, R. O. Dolomitic BIF beneficiation of Conceição - MG mine. **REM - International Engineering Journal**, v. 72, n. 2, p. 257–263, 2019.

REZENDE, S. E. Comunicação pessoal, 1992.

ROCHA, G. M.; GONÇALVES, G. M. C.; RAMOS, K. S.; COTA, T. G.; LIMA, R. M. F. Caracterização física, química e mineralógica de uma amostra de minério de ferro de Brucutu. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**. v. 16, n. 1, p. 88-94, 2009.

ROCHA, J. M. P. **Definição da tipologia e caracterização mineralógica e microestrutural dos itabiritos anfíbolíticos das minas de Alegria da Samarco Mineração S.A.** Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

ROSIÈRE, A. C., CHEMALE, F. J. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do quadrilátero ferrífero – uma visão geral e discussão. **Revista Geonômos**. UFMG, Belo Horizonte, MG. vol. 8 (2), p. 27-43, 2000.

SALAMA, W.; AREF, M. E.; GAUPP, R. Spectroscopic characterization of iron ores formed in different geological environments using FTIR, XPS, Mössbauer spectroscopy and thermoanalyses. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**. v. 136, part C, p. 1816 – 1826, 2015.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. Calcário e dolomito. *In: Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações*. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, p. 363-387, 2008.

SANTOS, G. M.; BRITO, M. M.; SOUZA, P. V. L.; BARROS, N. V. A. Determinação do índice de acidez em óleos de soja comercializados em supermercados varejistas. **Revista Científica FUNVIC**. v. 2, n. 2, p. 11-14, 2017.

SHAW, D. J. Introdução à Química dos Colóides e de Superfícies. Tradução: Maar, J. H. São Paulo: Edgard Blücher, 1975.

SHIBATA, J.; FUERSTENAU, D. W. Flocculation and flotation characteristics of fine hematite with sodium oleate. **International Journal of Mineral Processing**, v. 72, n. 1-4, p. 25–32, 2003.

SILVA, A. C.; SILVA E. M. S.; SILVA, T. C.; ALVES, B. E. Apatite microflotation using pequi oil. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy**, 124:4, P. 233-239, 2015.

SILVEIRA, M. A. C. W.; PAULA, N. N.; FERREIRA, R. F.; PEIXOTO, R. V.; OLIVEIRA, V.; MATA, V. O. A. Efeito da variação da relação amido/soda no processo de flotação catiônica de quartzo, p. 1099-1108. In: *43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e o 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro*, São Paulo, 2013.

SOARES, R. A. L.; NASCIMENTO, R. M.; PASKOCIMAS, C. A.; CASTRO, R. J. S. Avaliação da adição de dolomita em massa de cerâmica de revestimento de queima vermelha. **Cerâmica**, v. 90, p. 516 – 523, 2014.

SOUZA, A. C.; MAGALHÃES, D. G. Influência do grau de gelatinização do amido de milho no processo de flotação reversa de minério de ferro. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 13, n. 2, p. 141-147, 2016.

SOUZA, A. L.; ALBUQUERQUE, R. O.; LAMEIRAS, F. S.; PRAES, P. E.; PERES, A. E. C. Use of depressants in the direct flotation of a silicate-carbonate phosphate ore. **REM: Revista Escola de Minas**. v. 67, n. 2, p. 191-196, 2014.

SOUZA, M. O. G.; SANTOS, M. V. R.; CASTRO, L. M. F., SILVA, C. P. Production and in situ transformation of hematite into magnetite from the thermal decomposition of iron nitrate or goethite mixed with biomass. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. v. 139, p. 1731 – 1739, 2020.

SOUZA, N. E.; MATSUSHITA, M., VISENTAINER, J. V. Ácidos graxos: estrutura, classificação, nutrição e saúde. Arquivos da APADEC. v. 2, n. 2, p. 102-107, 1998.

SPIER, C. A. **Geoquímica e gênese das formações ferríferas bandadas e do minério de ferro da Mina de Águas Claras, Quadrilátero Ferrífero.** Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

VIEIRA, M.; LÉDO, P. G. S., LIMA, R. F. S., PAULO, J. B. A., BRANDÃO, P. R.G. Flotação de calcita a partir de óleos vegetais regionais saponificados como agentes coletores. *In: Anais do 6º Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica.* Campinas, Brasil. Campinas: UNICAMP, p. 1-5, 2005.

WILLS, B. A.; NAPIER–MUNN, T. **Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery.** 7. ed. Oxford: Elsevier Science e Technology Books, 450 p., 2006.

YU, F.; WANG, Y.; ZHANG, L.; ZHU, G. Role of oleic acid ionic–molecular complexes in the flotations of spodumene. *Minerals Engineering.* v. 71, p. 7 – 12, 2015.

ZHANG, H., LIU, W., HAN, C., WEI, D. Intensify dodecylamine adsorption on magnesite and dolomite surfaces by monohydric alcohols. **Applied Surface Science,** v. 444, p. 729-738, 2018.

APÊNDICE

Apêndice 1 – Resultados dos ensaios de tensão superficial

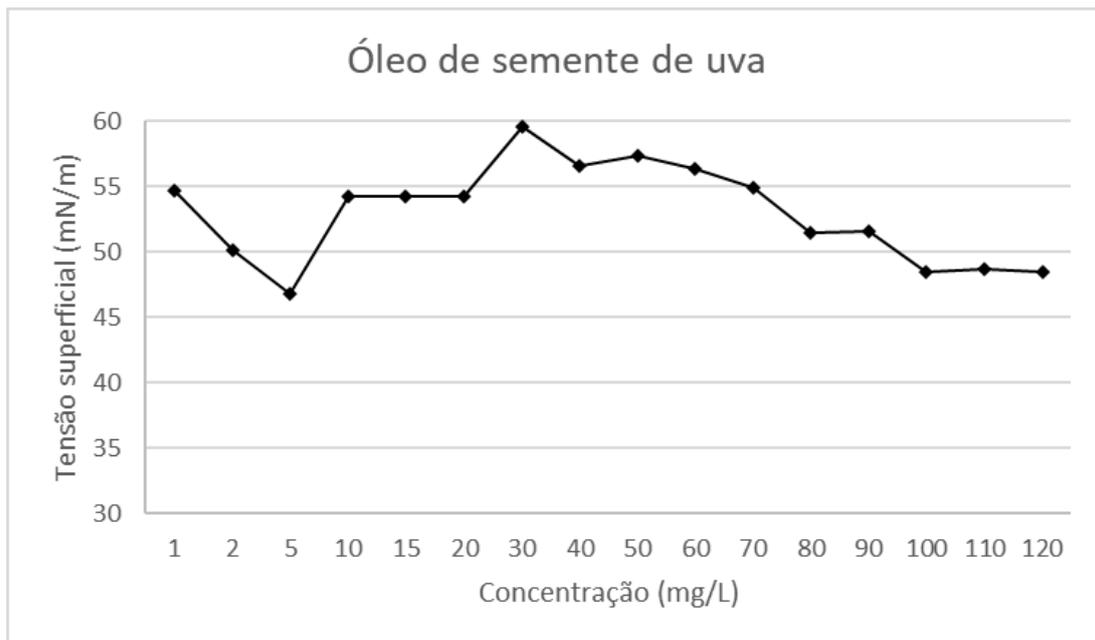
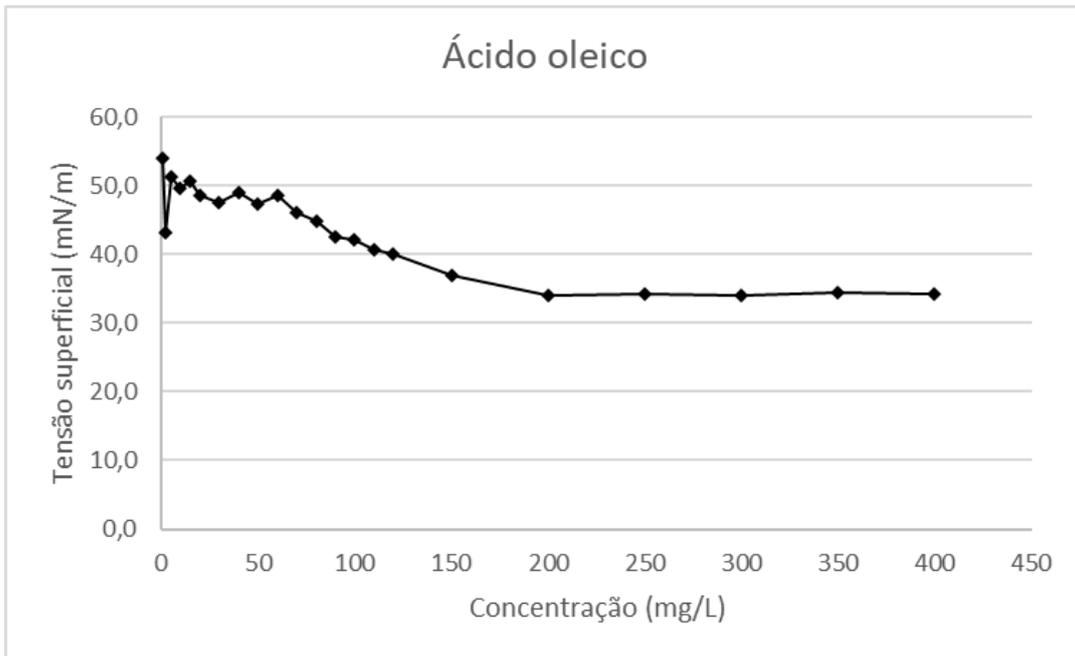
ÁCIDO OLEICO			
mg/L	Y ₁	Y ₂	Y _m
1	54,1	53,8	54,0
2	43,4	42,9	43,2
5	51,2	51,4	51,3
10	49,3	50,1	49,7
15	50,5	50,9	50,7
20	48,5	48,7	48,6
30	47,3	47,7	47,5
40	49	48,8	48,9
50	47,8	47	47,4
60	48,5	48,8	48,7
70	46,3	45,9	46,1
80	44,8	45	44,9
90	42,3	42,7	42,5
100	42	42,2	42,1
110	40,5	40,9	40,7
120	40	40,2	40,1
150	36,7	37	36,9
200	34	34,1	34,1
250	34,2	34,3	34,3
300	33,9	34,2	34,1
350	34,3	34,5	34,4
400	34,1	34,4	34,3

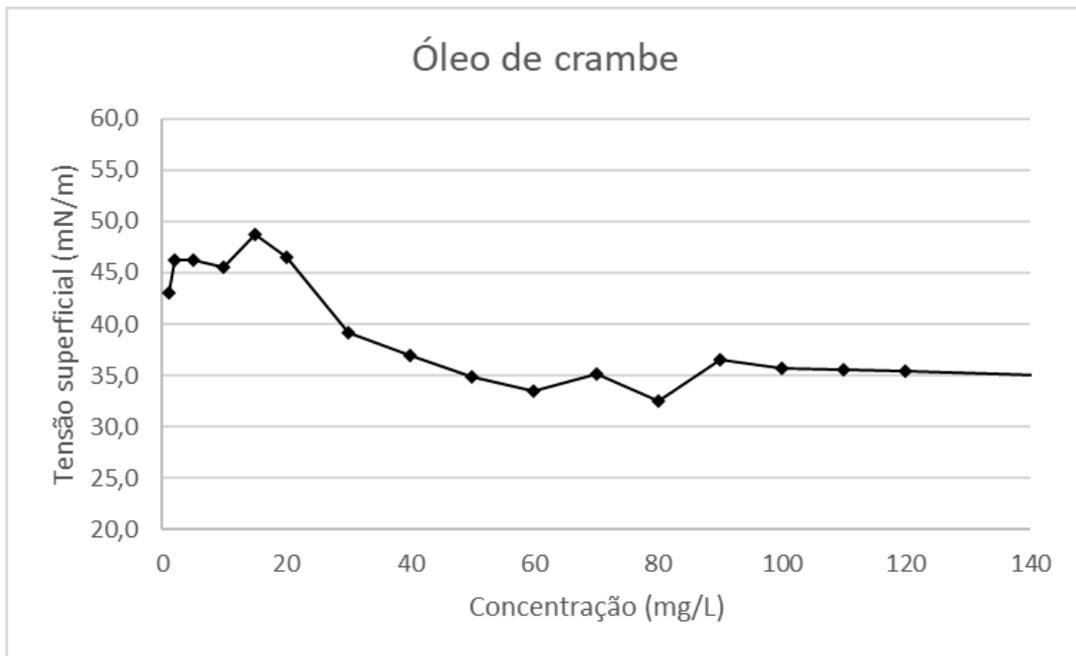
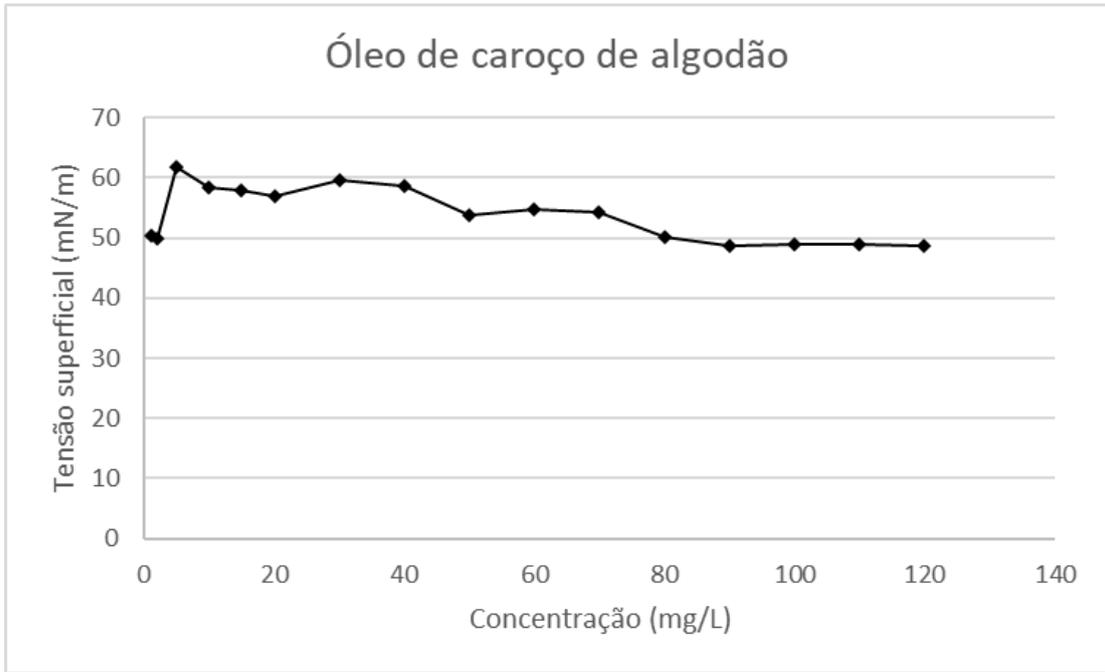
SEMENTE DE UVA			
mg/L	Y ₁	Y ₂	Y _m
1	54,1	55,3	54,7
2	49,3	51	50,15
5	46,6	47,1	46,85
10	54,8	53,7	54,25
15	54	54,5	54,25
20	54,3	54,2	54,25
30	59,9	59,2	59,55
40	56,2	57	56,6
50	57,3	57,5	57,4
60	56,5	56,2	56,35
70	55	54,8	54,9
80	51,4	51,6	51,5
90	51,5	51,7	51,6
100	48,3	48,7	48,5
110	48,8	48,5	48,65
120	48,6	48,3	48,45

CAROÇO DE ALGODÃO			
mg/L	Y₁	Y₂	Y_m
1	49,9	50,8	50,35
2	50	49,6	49,8
5	61,3	62	61,65
10	58	58,8	58,4
15	58,1	57,9	58
20	56,7	56,9	56,8
30	59,9	59,2	59,55
40	58,5	58,7	58,6
50	53,5	54,2	53,85
60	54,8	54,9	54,85
70	54,5	54,1	54,3
80	49,8	50,3	50,05
90	48,7	48,5	48,6
100	48,8	49,1	48,95
110	49	48,9	48,95
120	48,7	48,5	48,6

CRAMBE			
mg/L	Y₁	Y₂	Y_m
1	42,8	43,2	43,0
2	46	46,4	46,2
5	46,1	46,5	46,3
10	45,7	45,4	45,6
15	48,5	48,9	48,7
20	46,8	46,3	46,6
30	38,7	39,5	39,1
40	36,7	37,2	37,0
50	34,8	35	34,9
60	33,1	33,9	33,5
70	35,4	34,8	35,1
80	32,2	32,9	32,6
90	36,9	36,2	36,6
100	35,5	35,8	35,7
110	35,7	35,5	35,6
120	35,3	35,5	35,4
150	34,4	35,2	34,8
200	35,6	35,8	35,7

Apêndice 2 – Curvas de tensão superficial dos óleos.





Apêndice 2 – Recuperação média de hematita e dolomita resultantes da microflotação simplificada e sem depressor.

Recuperação da hematita.

pH	Ácido oleico	Semente de uva	Caroço de algodão	Crambe
5	74,66%	71,55%	74,93%	58,95%
6,1	79,99%	76,37%	78,72%	71,18%
7,2	82,59%	80,52%	78,54%	69,15%
8,3	87,01%	83,02%	77,79%	70,95%
9,4	72,41%	70,26%	66,41%	61,38%

Recuperação da dolomita.

pH	Ácido oleico	Semente de uva	Caroço de algodão	Crambe
5	98,85%	98,90%	99,38%	98,99%
6,1	98,90%	99,23%	98,71%	98,33%
7,2	99,02%	98,03%	99,51%	98,25%
8,3	99,02%	98,84%	99,12%	98,75%
9,4	98,92%	98,50%	99,22%	98,39%

**Apêndice 3 – Teores brutos de hematita e dolomita resultantes da microflotação
com mistura binária e sem depressor.**

Teores determinados através da picnometria.

pH	Ensaio	Ácido oleico		Semente de uva		Caroço de algodão		Crambe	
		Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita
5	A	44,52%	55,48%	30,09%	69,91%	42,51%	57,49%	43,73%	56,27%
5	B	41,97%	58,03%	33,01%	66,99%	43,69%	56,31%	41,10%	58,90%
6,1	A	44,77%	55,23%	37,36%	62,64%	47,86%	52,14%	58,26%	41,74%
6,1	B	46,48%	53,52%	39,83%	60,17%	46,93%	53,07%	60,70%	39,30%
7,2	A	52,80%	47,20%	41,36%	58,64%	44,23%	55,77%	45,33%	54,67%
7,2	B	51,51%	48,49%	43,83%	56,17%	42,07%	57,93%	47,49%	52,51%
8,3	A	50,09%	49,91%	36,79%	63,21%	36,82%	63,18%	50,57%	49,43%
8,3	B	53,83%	46,17%	36,37%	63,63%	37,81%	62,19%	54,19%	45,81%
9,4	A	22,79%	77,21%	34,67%	65,33%	37,80%	62,20%	44,66%	55,34%
9,4	B	23,74%	76,26%	35,71%	64,29%	40,10%	59,90%	47,46%	52,54%

Teores determinados através da calcinação.

pH	Ensaio	Ácido oleico		Semente de uva		Caroço de algodão		Crambe	
		Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita
5	A	43,81%	56,19%	42,22%	57,78%	44,51%	55,49%	38,98%	61,02%
5	B	42,89%	57,11%	39,71%	60,29%	46,47%	53,53%	40,81%	59,19%
6,1	A	47,08%	52,92%	49,90%	50,10%	50,08%	49,92%	55,52%	44,48%
6,1	B	45,06%	54,94%	47,07%	52,93%	48,12%	51,88%	53,80%	46,20%
7,2	A	42,17%	57,83%	46,54%	53,46%	49,35%	50,65%	49,71%	50,29%
7,2	B	45,96%	54,04%	43,70%	56,30%	52,02%	47,98%	50,34%	49,66%
8,3	A	48,14%	51,86%	47,89%	52,11%	35,36%	64,64%	39,00%	61,00%
8,3	B	45,89%	54,11%	45,44%	54,56%	33,22%	66,78%	42,30%	57,70%
9,4	A	35,55%	64,45%	43,91%	56,09%	45,47%	54,53%	44,73%	57,70%
9,4	B	37,19%	62,81%	45,65%	54,35%	47,22%	52,78%	45,36%	54,64%

Teores determinados através da análise de imagem.

pH	Ensaio	Ácido oleico		Semente de uva		Caroço de algodão		Crambe	
		Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita
5	A	31,29%	68,71%	45,12%	54,88%	37,19%	62,81%	48,30%	51,70%
5	B	29,03%	70,97%	43,42%	56,58%	35,94%	64,06%	54,76%	45,24%
6,1	A	40,52%	59,48%	39,92%	60,08%	36,53%	63,47%	62,76%	37,24%
6,1	B	43,05%	56,95%	43,40%	56,60%	33,09%	66,91%	66,04%	33,96%
7,2	A	44,77%	55,23%	28,08%	71,92%	38,08%	61,92%	46,53%	53,47%
7,2	B	47,66%	52,34%	32,14%	67,86%	41,38%	58,62%	48,59%	51,41%
8,3	A	41,70%	58,30%	34,14%	65,86%	43,23%	56,77%	57,51%	42,49%
8,3	B	46,41%	53,59%	37,33%	62,67%	48,20%	51,80%	54,79%	45,21%
9,4	A	30,50%	69,50%	29,32%	70,68%	42,76%	57,24%	54,07%	45,93%
9,4	B	25,21%	74,79%	25,33%	74,67%	38,26%	61,74%	58,95%	41,05%

Apêndice 4 – Teores médios de hematita e dolomita resultantes da microflotação com mistura binária e sem depressor.

Teores determinados através da picnometria.

pH	Ácido oleico		Caroço de algodão		Semente de uva		Crambe	
	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita
5	53,78%	46,22%	56,14%	43,86%	64,43%	35,57%	56,20%	43,80%
6,1	54,00%	46,00%	50,76%	49,24%	60,81%	39,19%	39,73%	60,27%
7,2	46,81%	53,19%	55,37%	44,63%	55,42%	44,58%	51,88%	48,12%
8,3	46,11%	53,89%	62,89%	37,11%	61,60%	38,40%	47,54%	52,46%
9,4	75,84%	24,16%	61,82%	38,18%	63,93%	36,07%	52,11%	47,89%

Teores determinados através da calcinação.

pH	Ácido oleico		Semente de uva		Caroço de algodão		Crambe	
	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita
5	43,35%	56,65%	40,96%	59,04%	45,49%	54,51%	39,89%	60,11%
6,1	46,07%	53,93%	48,48%	51,52%	49,10%	50,90%	54,66%	45,34%
7,2	44,06%	55,94%	45,12%	54,88%	50,69%	49,31%	50,03%	49,97%
8,3	47,02%	52,98%	46,66%	53,34%	34,29%	65,71%	40,65%	59,35%
9,4	36,37%	63,63%	44,78%	55,22%	46,35%	53,65%	45,05%	54,95%

Teores determinados através da análise de imagem.

pH	Ácido oleico		Semente de uva		Caroço de algodão		Crambe	
	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita
5	30,16%	69,84%	44,27%	55,73%	36,56%	63,44%	51,53%	48,47%
6,1	41,78%	58,22%	41,66%	58,34%	34,81%	65,19%	64,40%	35,60%
7,2	46,21%	53,79%	30,11%	69,89%	39,73%	60,27%	47,56%	52,44%
8,3	44,05%	55,95%	35,73%	64,27%	45,71%	54,29%	56,15%	43,85%
9,4	27,86%	72,14%	27,33%	72,67%	40,51%	59,49%	56,51%	43,49%

**Apêndice 5 – Teores brutos de hematita e dolomita resultantes da microflotação
com mistura binária e com depressor.**

Teores brutos de hematita e dolomita.

pH	Ensaio	Ácido oleico		Semente de uva		Caroço de algodão		Crambe	
		Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita
6,1	A	37,18%	62,82%	36,57%	63,43%	43,81%	56,19%	52,39%	47,61%
6,1	B	35,93%	64,07%	35,89%	64,11%	42,38%	57,62%	53,65%	46,35%
8,3	A	38,64%	61,36%	43,49%	56,51%	39,70%	60,30%	52,97%	47,03%
8,3	B	41,49%	58,51%	42,21%	57,79%	39,34%	60,66%	54,47%	45,53%
9,4	A	39,95%	60,05%	44,69%	55,31%	41,88%	58,12%	45,70%	54,30%
9,4	B	36,85%	63,15%	43,50%	56,50%	43,61%	56,39%	42,47%	57,53%
10,5	A	35,56%	64,44%	34,05%	65,95%	38,33%	61,67%	42,69%	57,31%
10,5	B	36,99%	63,01%	36,46%	63,54%	39,69%	60,31%	43,19%	56,81%

**Apêndice 6 – Teores médios de hematita e dolomita resultantes da microflotação
com mistura binária e com depressor.**

Teores médios de hematita e dolomita.

pH	Ácido oleico		Semente de uva		Caroço de algodão		Crambe	
	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita	Hematita	Dolomita
5	36,56%	63,44%	36,23%	63,77%	43,09%	56,91%	53,02%	46,98%
6,1	40,07%	59,93%	42,85%	57,15%	39,52%	60,48%	53,72%	46,28%
7,2	38,40%	61,60%	44,09%	55,91%	42,75%	57,25%	44,08%	55,92%
8,3	36,28%	63,72%	35,26%	64,74%	39,01%	60,99%	42,94%	57,06%

ANEXO

Anexo 1 – Equações de distribuições granulométricas e parâmetros de ajuste da regressão não-linear

Harris	$Y = 1 - \left[1 - \left(\frac{x}{x_{max}} \right)^n \right]^m$
Gaudin-Meloy	$Y = 1 - \left[1 - \left(\frac{x}{x_{max}} \right)^n \right]^n$
Rosin-Rammler	$Y = 1 - \exp \left[\ln \left(\frac{1}{2} \right) + \left(\frac{x}{x_{50}} \right)^n \right]$
Gates-Gaudin-Schumman	$Y = \left(\frac{x}{x_{max}} \right)^n$

**Anexo 2 – Constante “κ” do viscosímetro capilar de Ostwald
(modelo Cannon-Fenske).**

Número do capilar	Diâmetro do capilar (mm)	Constante K (valor aproximado)
25	0,30	0,002
50	0,44	0,004
75	0,54	0,008
100	0,63	0,015
150	0,77	0,035
200	1,01	0,1
300	1,26	0,25
350	1,52	0,5
400	1,92	1,1
450	2,30	2,5
500	3,20	8
600	4,10	2

Anexo 3 – Equação da recuperação metalúrgica em função dos teores dos elementos.

$$RM = \frac{c(a - r)}{a(c - r)}$$

a – teor do componente “i” na alimentação [%];

c – teor do componente “i” no concentrado [%];

r – teor do componente “i” no rejeito [%].

Anexo 4 – Equação do índice de seletividade de Gaudin.

$$I.S. = \sqrt{\frac{c}{c_{ganga}} \times \frac{r_{ganga}}{r}}$$

Onde:

c — teor do mineral de interesse no concentrado [%];

c_{ganga} — teor da ganga no concentrado [%];

r — teor do mineral de interesse no rejeito [%];

r_{ganga} — teor da ganga no rejeito [%].