



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



Rubens Procópio de Moraes

**UTILIZAÇÃO DA *MORINGA OLEÍFERA* NA AGREGAÇÃO
DE HEMATITA E QUARTZO**

Ouro Preto

2022

Rubens Procópio de Moraes

**UTILIZAÇÃO DA *MORINGA OLEÍFERA* NA AGREGAÇÃO
DE HEMATITA E QUARTZO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Tratamento de minérios

Orientador: Prof. Dra. Érica Linhares Reis

Coorientador: M e. Warleson Cândido dos Santos Vieira

Ouro Preto

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M827u Moraes, Rubens Procópio de.
Utilização da moringa oleífera na agregação de hematita e quartzo.
[manuscrito] / Rubens Procópio de Moraes. - 2022.
32 f.: il.: color..

Orientadora: Profa. Dra. Érica Linhares Reis.
Coorientador: Me. Warleson Cândido dos Santos Vieira.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Beneficiamento de minério. 2. Minério de ferro. 3. Rejeitos
(Mineração). 4. Moringa oleífera. 5. Água - Purificação - Flocculação. I.
Reis, Érica Linhares. II. Vieira, Warleson Cândido dos Santos. III.
Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 622.794

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Rubens Procópio de Moraes

UTILIZAÇÃO DA *MORINGA OLEÍFERA* NA AGREGAÇÃO DE HEMATITA E QUARTZO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 11 de outubro de 2022

Membros da banca

Doutora - Érica Linhares Reis - Orientador(a) (UFOP)
Mestre - Mariana Caroline Andrade Silva - (UFOP)
Mestre - Flávio Luiz Martins - (UFOP)

Érica Linhares Reis, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/11/2022



Documento assinado eletronicamente por **Erica Linhares Reis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/11/2022, às 09:07, 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 **0430549** e o código CRC **2EF39DFE**.

Aos meus pais pelo amor incondicional e aos meus irmãos por terem sido os melhores que eu poderia ter.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me guiar e me abençoar todos os dias.

A minha família por todo o apoio e auxílio em todos esses anos.

Agradeço as repúblicas de Ouro Preto em especial a Gloriosa República Vira Saia pelos ensinamentos.

A UFOP pelo ensino de qualidade e gratuito, à professora Erica Linhares por me orientar nesse processo, ao Warleson pelo apoio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formação de flocos por meio de pontes	14
Figura 2 - Mecanismo de reversão localizada de carga.....	14
Figura 3 – (A) Árvore, (B) semente, (C) folha, (D) flor, da <i>Moringa Oleífera</i>	16
Figura 4 - Diagrama representativo de uma partícula carregada em suspensão num meio de dispersão.	18
Figura 5 -Potencial zeta para hematita pura	19
Figura 6 - Potencial zeta para quartzo puro.....	20
Figura 7 – Semente da <i>Moringa Oleífera</i> nas fases: com casca, sem casca e triturada.....	21
Figura 8 - Distribuição granulométrica da amostra de hematita e quartzo.....	23
Figura 9 - Difratoograma da amostra de hematita.....	24
Figura 10 – Difratoograma da amostra de quartzo.....	24
Figura 11 - Média de % sedimentado para cada faixa de pH do quartzo, com % de erro de duplicata. 25	
Figura 12 - Média de % sedimentado para cada faixa de pH da hematita, com % de erro de duplicata.25	
Figura 13 - Comparação dos testes em branco, do usa da poliacrilamida e da <i>Moringa oleífera</i> para quartzo e hematita no pH 7.	26

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS:	11
	2.1 Objetivo Geral:	11
	2.2 Objetivos Específicos:.....	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
	3.1 Rejeitos do Beneficiamento de Minérios de ferro	12
	3.2 Coagulação e Floculação	12
	3.3 <i>Moringa oleífera</i> :.....	16
	3.4 Potencial Zeta.....	18
4	MATERIAIS E MÉTODOS FAZER FLUXOGRAMA DE METODOLOGIA	21
	4.1 Preparação e caracterização das amostras.....	21
	4.2 Preparo da <i>Moringa oleífera</i>	21
	4.3 Ensaios de Agregação.....	22
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
	5.1 Caracterização dos Minerais Puros Utilizados nos Ensaios.....	23
	5.2 Ensaios de Agregação.....	25
	5.3 Potencial Zeta.....	27
6	CONCLUSÕES.....	28
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

RESUMO

Em um cenário o qual a exploração de minérios complexos está se tornando cada vez mais difícil, a agregação de partículas ultrafinas e coloidais de minério de ferro e, em paralelo a busca pela obtenção de uma água de qualidade a separação sólido/líquido se torna uma etapa crítica nas plantas industriais. Os reagentes utilizados atualmente nesse processo possuem alto custo e são potencialmente tóxicos para o meio ambiente e consumo humano, com isso, fontes naturais têm sido investigadas como agentes flocculantes e tem demonstrado resultados satisfatórios. Logo, este trabalho tem como principal objetivo de avaliar o uso da *Moringa oleífera* como agente de agregação e sedimentação de partículas minerais de hematita e quartzo em ensaios separados utilizando pH nos valores de 5, 7 e 10 na dosagem de 2 mg/L. Os testes foram feitos com polpa hematita e quartzo com 5 % de sólidos em um total de 200 mL cada, os resultados obtidos foram do teste de agregação e porcentagem sedimentada. Os maiores resultados de material sedimentado foram de 97,35% e 50,17% para hematita (pH 7) e quartzo (pH 10), respectivamente. Com todos os resultados obtidos nos testes de agregação e com os dados extraídos na literatura, pôde-se considerar o uso da *Moringa oleífera* como agente auxiliar na sedimentação de rejeito de minério de ferro.

Palavras-chave: *Moringa oleífera*; rejeito de minério de ferro; floculação.

ABSTRACT

In a scenario in which the exploitation of complex ores is becoming increasingly difficult, the aggregation of ultrafine and colloidal iron ore particles and, in parallel with the search for quality water, solid/liquid separation becomes a critical step in industrial plants. The reagents currently used in this process have a high cost and are potentially toxic to the environment and human consumption, therefore, natural sources have been investigated as flocculating agents and have shown satisfactory results. Therefore, the main objective of this work is to evaluate the use of *Moringa oleifera* as an aggregation and sedimentation agent for hematite and quartz mineral particles in separate tests using pH values of 5, 7 and 10 at a dosage of 2 mg/L. The tests were carried out with hematite and quartz pulp with 5% solids in a total of 200 mL each, the results obtained were from the aggregation test and sedimented percentage. The highest results of sedimented material were 97.35% and 50.17% for hematite (pH 7) and quartz (pH 10), respectively. With all the results obtained in the aggregation tests and the data extracted from the literature, it was possible to consider the use of *Moringa oleifera* as an auxiliary agent in the sedimentation of iron ore tailings.

Palavras-chave: *Moringa oleifera*; iron ore tailings; flocculation

1 INTRODUÇÃO

A redução de teores das espécies de interesse na exploração do minério de ferro leva a liberação em granulações cada vez menores, fazendo-se necessário a utilização de etapas para redução do tamanho, gerando assim partículas ultrafinas que demandam um tratamento mais complexo. Deste modo, o beneficiamento de minérios de ferro de baixo teor levam a produção de grandes quantidades de rejeitos.

Leite (2019) descreve a importância da etapa de desaguamento de rejeitos do minério de ferro, no processamento mineral. Além da necessidade de recuperação adequada da água do processo para que essa não seja descartada como efluente líquido e também possa atender de forma adequado no reuso. Sendo assim, a sedimentação das partículas suspensas, e por sua vez a obtenção da água com qualidade adequada se torna um desafio.

Atualmente a etapa de floculação utiliza reagentes que possuem alto custo e possuem potencial de toxicidade para o meio ambiente e consumo humano. Um exemplo é a poliacrilamida, que possui toxidez e caráter cancerígeno (GALEŠA *et al.*, 2008).

O uso de um reagente natural é uma boa alternativa levando em conta suas características de biodegradação, de versatilidade e baixo custo. Em Silva *et al.* (2018), alguns autores vêm desenvolvendo trabalhos mostrando o potencial da *Moringa oleífera* como coagulante/floculante nos processos de separação sólido-líquido da mineração.

Logo, este trabalho tem como objetivo avaliar a utilização de reagente preparado a partir da semente de *Moringa oleífera* como agente auxiliare na sedimentação dos minerais hematita e quartzo, comumente, encontrados em efluentes obtidos a partir do beneficiamento de minério de ferro.

2 OBJETIVOS:

2.1 Objetivo Geral:

- Avaliar o uso da *Moringa oleífera* como agente auxiliar na sedimentação de partículas minerais de hematita e quartzo, comumente encontradas em rejeitos de minério de ferro.

2.2 Objetivos Específicos:

- Utilizar a *Moringa oleífera* para testes fundamentais de agregação de quartzo e de hematita separadamente.
- Estudar os efeitos da variação de pH na utilização da *Moringa oleífera* como agente de sedimentação.
- Comparar o desempenho da *Moringa oleífera* com testes realizados com a poliacrilamida (LEITE, 2019).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Rejeitos do Beneficiamento de Minérios de ferro

Segundo IBRAM (2021) o minério de ferro está entre os principais produtos exportados pelo Brasil. No ano de 2021 representou 73,7% do faturamento do setor mineral sendo 357,7 milhões de toneladas. Sendo os maiores depósitos, do Brasil, as formações ferríferas bandadas, denominadas de itabirito (BEZERRA, 2017).

O ferro é o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre (BEZERRA, 2017), e os minerais mais relevantes que o contém são a hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) e goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), entretanto sua ocorrência geralmente está associada a outros minerais considerados como impurezas, como: sílica, compostos de enxofre, alumina, fósforo, entre outros. Com isso, são empregadas técnicas de processamento mineral, tais como: fragmentação, peneiramento, concentração, separação sólido/líquido, entre outras operações para que haja adequação de teor e granulometria afim de atender as necessidades do mercado (MAPA, 2006).

O tratamento ou o beneficiamento do minério de ferro consiste de operações que visam adequar a granulometria, a concentração relativa e das espécies minerais sem modificar a identidade química ou física dos minerais (LUZ, SAMPAIO & FRANÇA, 2010).

Após o processamento mineral, todo material gerado que não possui valor econômico devido a suas impurezas ou a sua granulometria é considerado rejeito, devido à falta de tecnologia ou viabilidade econômica das técnicas existentes para a concentração desse tipo de material (LEITE 2019).

Durante as etapas de beneficiamento, dependendo do grau de liberação do mineral de interesse é possível que os rejeitos possuam granulometria fina e ultrafina. Segundo a classificação estabelecida por Somasundaran (1980), partículas finas são as que possuem tamanho entre $10\mu\text{m}$ e $100\mu\text{m}$, e as partículas ultrafinas com tamanho menor do que $10\mu\text{m}$ e maior do que $1\mu\text{m}$ e partículas menores que $1\mu\text{m}$ são consideradas partículas coloidais.

3.2 Coagulação e Floculação

Os processos de coagulação e floculação que serão abordados nesse estudo, são tecnologias muito empregadas no tratamento de água e efluentes para realização de separação sólido-líquido devido à facilidade da operação e custo-benefício (MACHADO, 2019).

Segundo Renault (2009) existem duas classes principais que são utilizadas no processo de coagulação e floculação. A primeira é composta por coagulantes orgânicos e inorgânicos, como sais de cálcio, sulfato de alumínio, cloreto férrico, policloreto de alumínio e polieletrólitos. Já a segunda classe inclui floculantes orgânicos que compreendem polieletrólitos aniônicos e catiônicos, anfóteros, polímeros não-iônicos e os floculantes naturais (derivados de amido, alginatos e taninos).

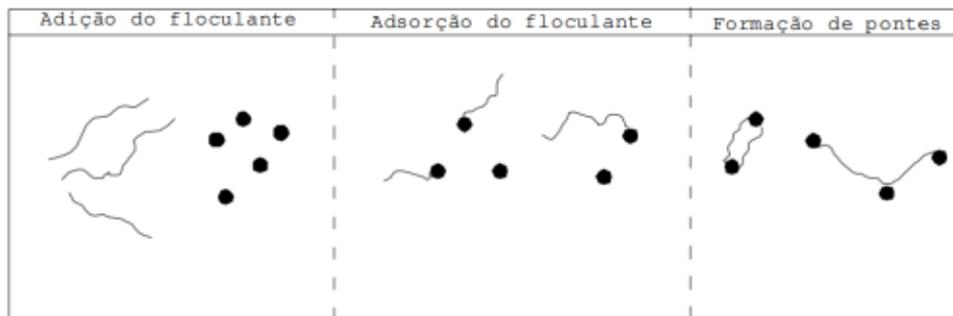
A coagulação caracteriza-se como a etapa inicial da desestabilização de uma suspensão. É obtida pela adição de sais orgânicos que se dissociam em solução aquosa, alterando assim a carga superficial das partículas promovendo a adsorção específicas dos íons causada pela repulsão entre as mesmas. Geralmente, o coagulante é adicionado à água durante ou anteriormente a agitação para realizar uma distribuição uniforme aumentando a energia cinética e assim superar a barreira energética de repulsão. A ação dos coagulantes pode ocorrer pelos seguintes mecanismos: compressão da camada difusa, adsorção e neutralização de carga, varredura das partículas suspensas, adsorção de agente coagulante e formação de pontes (DI BERNARDO, 1993 *apud* CARVALHO, 2005; DI BERNARDO, 1993 *apud* PAVANELLI, 2001).

A cal é um exemplo de coagulante utilizado na mineração. A mesma pode alterar o potencial zeta da polpa para valores que conferem o estado de agregação das partículas (SAMPAIO, 2022 *apud* SOUZA, 2014).

Segundo Luz *et al.* (2010) a floculação é a agregação de partículas finas desestabilizadas formando flocos pelo uso de polímeros, necessariamente solúveis em água. Como consequência as partículas ficam recobertas pelas moléculas poliméricas e sedimentam devido ao seu tamanho e massa específica. Os polímeros podem ser classificados pela sua origem, carga elétrica e peso molecular, podendo ser naturais, modificados ou sintéticos.

Os principais mecanismos da floculação são (BRATBY, 2006; LUZ, SAMPAIO & FRANÇA, 2010):

1. Formação de Pontes (Figura 1): sobressaem em sistemas com a utilização de polímeros não iônicos ou que possuam a mesma carga de superfície mineral. As pontes são formadas quando ocorre a adsorção das partículas coloidais na superfície das diversas cadeias dos polímeros ocasionando o entrelaçamento das mesmas, com isso ocorre o



aumento da densidade do aglomerado e por fim ocorre sua sedimentação.

Figura 1 - Formação de flocos por meio de pontes

Fonte: DIAS *et al.* (2004).

2. Reversão localizada (Figura 2): a interação entre o polímero de alta densidade de carga com a superfície da partícula de baixa densidade de carga ocorre a reversão da carga elétrica na área recoberta pelo reagente. Os flocos são formados devido a atração da região com carga revertida com uma partícula de carga oposta.

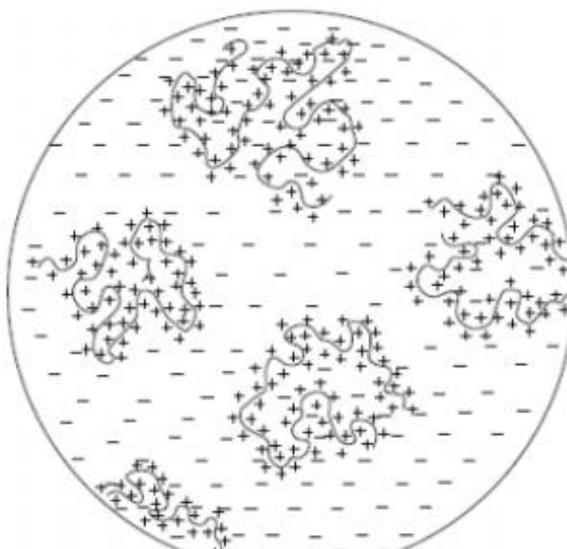


Figura 2 - Mecanismo de reversão localizada de carga.

Fonte: BRATBY (2006).

3. Neutralização de cargas: ocorre quando há redução da repulsão eletrostática entre as partículas gerando a neutralização de cargas opostas da superfície mineral

As poliacrilamidas são os flocculantes mais utilizados pelas mineradoras no Brasil. A poliacrilamida é obtida através da polimerização da acrilamida podendo ser utilizadas como não-iônicas, porém industrialmente são parcialmente hidrolisadas com ácido acrílico recebendo um caráter aniônico (ARINAITWE & PAWLIK, 2013). As poliacrilamidas são polímeros solúveis em água e podem ser classificados como espécies não iônicas, aniônicas e catiônicas (SUN-YI HUANG, 2001).

Desde 1997 a União Europeia traz avaliações sobre os riscos ambientais da acrilamida (WEIDEBORG, 2001). Durante a construção de um túnel em 1977, na Suécia, foi utilizado gel selante composto de acrilamida N-metilacrilamida. Porém com o vazamento do lençol freático da região presume-se que o alto fluxo de água dificultou o processo de polimerização da acrilamida, permitindo que grandes quantidades vazassem para o meio ambiente (HAGMAR, 2001; REYNOLDS, 2002; WEIDEBORG, 2001). Devido à alta concentração de acrilamida e N- metilacrilamida (92mg/L e 342mg/L) houve na região problemas com a alta mortalidade dos peixes e paralisia no gado (WEIDEBORG, 2001).

Leite (2019) realizou estudos para avaliar a utilização de amidos modificados como flocculantes alternativos, menos tóxicos e de menor custo comparando com o uso de poliacrilamida. Foram realizados testes com amostras puras de quartzo e hematita, nas concentrações: 1mg/L, 10mg/L e 100mg/L e nos valores de pH entre 6 e 9. Para hematita o maior valor encontrado de agregação, utilizando a poliacrilamida, foi para a concentração de 1mg/L em todos os pH, sendo o maior no pH 6 com a porcentagem de 99,52% de sólidos sedimentados. O amido catiônico foi o mais eficiente, para a sedimentação, utilizando a mesma concentração no pH 8 (97,81%) dentre os amidos modificados. Para o Quartzo, em nenhum pH os testes ultrapassaram 50% de sedimentados utilizando a poliacrilamida e os testes dos amidos modificados, foi possível observar que não houve floculação independente do pH.

3.3 *Moringa oleífera*:

A *Moringa oleífera* é uma árvore nativa do noroeste da Índia e suas raízes, folhas, flores e sementes são usadas no país para fins medicinais. Uma árvore de porte médio que cresce bem em quase todo tipo de solo exceto em argilas duras e cresce melhor em planícies (RAMACHANDRAN, *et al.* 1980). A Figura 4 apresenta a imagens da *Moringa oleífera*:

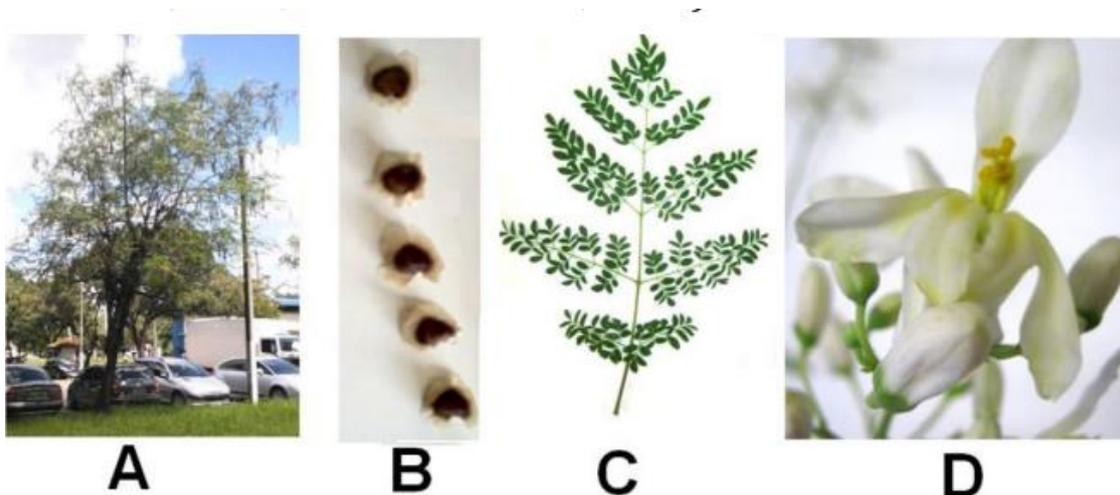


Figura 3 – (A) Árvore, (B) semente, (C) folha, (D) flor, da *Moringa Oleífera*.

Fonte: SILVA *et al.* (2018).

Segundo Silva *et al.* (2018), são necessários maiores estudos, da árvore como um todo, para entender os componentes da *Moringa oleífera* responsáveis efetivamente pela coagulação de compostos que trazem cor e turbidez às águas. Seus mecanismos de atuação como coagulante natural também devem ser observados. Na obra *Potencialidades da Moringa oleífera* Lam cita que muitos autores defendem que há uma proteína presente na semente que é responsável pela coagulação/floculação, enquanto outros autores questionam tal responsável. Segundo Ndabigengesere *et al.* (1995) a adsorção e neutralização de cargas ou adsorção de partículas de ponte desestabilizadas seria o mecanismo ativo de coagulação presente na semente moringa com água, enquanto para Okuda *et al.* (2001), a utilização de solução salina pode trazer resultados diferentes do mecanismo de coagulação do que utilizando apenas água. Tal diferença pode ser uma coagulação mais eficiente, especialmente para águas com turbidez mais baixa.

Segundo Abdulkarim *et al.* (2005) a extração do óleo das sementes não diminui sua propriedade coagulante, criando mais possibilidades para o uso da semente. De forma geral os estudos vêm

demonstrando capacidade efetiva antimicrobiana da *Moringa oleífera*, auxiliando para uma água de qualidade. Mostrando o amplo potencial de uso que a *Moringa oleífera* pode oferecer.

Na mineração, foi avaliado por Magalhães (2014) a eficiência e utilização da *Moringa oleífera*, como floculante, na indústria de petróleo para o tratamento de seus efluentes. O reagente natural não apresentou eficiência superior aos floculantes comerciais, uma vez que teve um máximo de 90% de eficácia em um dos testes realizados enquanto os floculantes comerciais ultrapassaram essa marca em doze testes, porém foi concluído que é um reagente de baixo custo que traz menores impactos ambientais. Magalhães (2014) ainda determinou o potencial zeta da *Moringa oleífera* para o pH de 6,8 sendo utilizado como floculante em 10000 ppm aproximadamente e, encontrou o valor de + 9,23 mV.

Em estudos feitos por Oliveira (2016) foi utilizado sulfato de alumínio como coagulante em um primeiro ensaio, em um segundo ensaio utilizou poliacrilamida não iônica e o coagulante e um terceiro ensaio utilizou apenas *Moringa oleífera* como agente auxiliar de agregação. Os testes foram feitos para o tratamento de efluentes gerados a partir da produção de ferroligas de manganês. Os ensaios um e dois apresentaram resultados melhores em relação a turbidez (14,22NTU) da água quando comparados utilizando apenas a *Moringa oleífera* (43,93NTU). Para o pH, os resultados foram similares. O autor destaca que a *Moringa Oleífera* mesmo apresentando resultados com menor desempenho pode ser considerado um floculante em potencial, desde sejam realizados maiores estudos.

Silva (2017) realizou testes de sedimentação utilizando diferentes agentes auxiliares em um rejeito de minério de ferro para avaliar a velocidade de sedimentação das partículas e a qualidade da água recuperada. Foram utilizados como coagulantes cal e sulfato de alumínio, com dosagem de 30mg/L para ambos. Os floculantes utilizados foram poliacrilamidas de naturezas catiônica, não iônica e aniônica, todas na dosagem de 2mg/L. A *Moringa Oleífera* foi utilizada reagente auxiliar de origem natural nas dosagens de 30mg/L e 2mg/L. A melhor condição foi observada quando se utilizou apenas o floculante não iônico (2mg/L), com pH médio de 7,1 onde a zona de compactação foi alcançada antes dos 50 segundos e turbidez igual a 47 UNT, velocidade de sedimentação igual a 12cm/min e concentração mássica de 15%. Já para a *Moringa Oleífera*, os melhores resultados obtidos foram para a concentração de 2mg/L atingindo a zona de compactação após, aproximadamente 1000 segundos, com pH médio de 6,9, 45UNT, velocidade de sedimentação de 0,48cm/min e concentração mássica de 12%.

Concluindo que o reagente natural oriundo da semente da *Moringa Oleífera* não foi apresentou maior eficiência que os reagentes comerciais.

Carvalho (2005) realizou estudos utilizando um preparado salino do extrato de sementes da *Moringa Oleífera* como coagulante para clarificação de águas pluviais que escoavam pelos taludes de uma das cavas da lavra da Mina de Alegria - Mariana (MG). A fração sólida da água coletada eram, predominantemente, de goethita, hematita e caulinita. Os ensaios utilizando o extrato salino (250ppm) apresentaram uma redução de 80% na turbidez.

3.4 Potencial Zeta

O potencial zeta é o potencial eletrocinético no plano de cisalhamento entre a partícula e a solução medido quando os dois estão em movimento relativo, com um campo elétrico presente, para soluções flocculantes, que contém as partículas carregadas, íons, podem ser atraídas por cargas opostas encontradas na superfície de outras partículas no meio (MALVERN INSTRUMENTS LTD, 2004). A Figura 3 mostra a formação da dupla camada elétrica ao redor das partículas carregas:

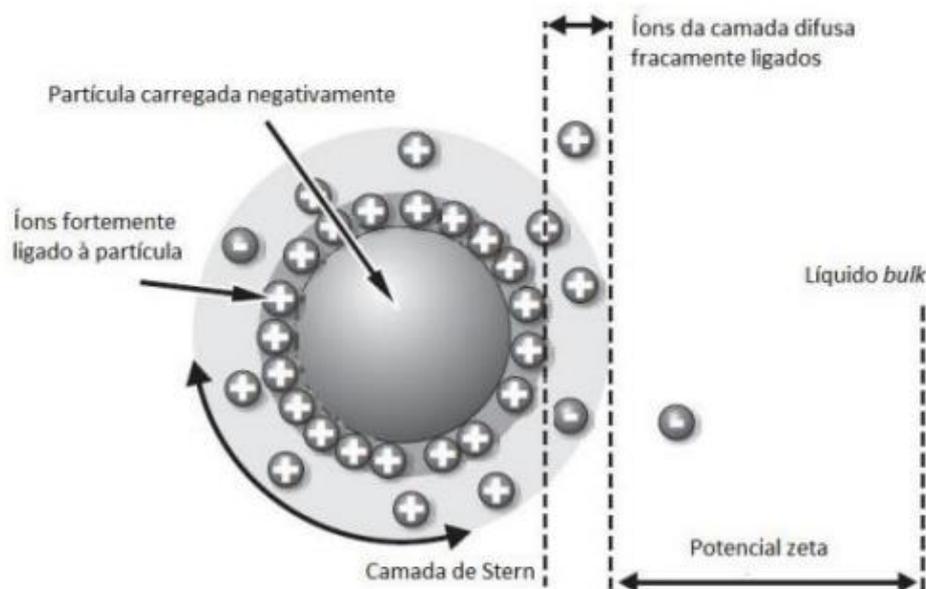


Figura 4 - Diagrama representativo de uma partícula carregada em suspensão num meio de dispersão.

Fonte: MACHADO (2019)

O potencial zeta avalia a estabilidade em um sistema coloidal, valores altos em modulo do potencial zeta demonstram uma tendencia de repulsão das partículas, portanto um sistema mais estável e que dificulta a floculação. Para valores baixos em modulo do potencial zeta, essa estabilidade é menor, sendo assim, a desestabilização das partículas se torna mais fácil e com isso a aglomeração do sistema (MALVERN INSTRUMENTS LTD, 2004). Sua análise auxilia na compreensão do tipo de interação que ocorre entre as partículas minerais e os reagentes presentes na solução, fornecendo informações importantes a serem observadas para a agregação de partículas por meio da coagulação (LEITE, 2019).

Leite (2019) realizou experimentos para determinar o potencial zeta da hematita e do quartzo, ambos puros, para várias faixas de pH, sendo representadas nas figuras 5 e 6 respectivamente.

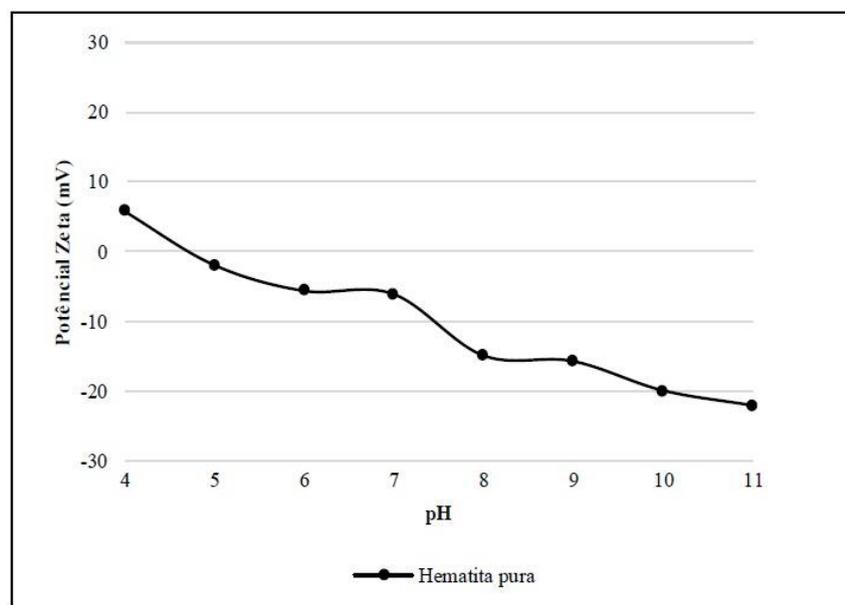


Figura 5 -Potencial zeta para hematita pura

Fonte: adaptado de Leite (2019).

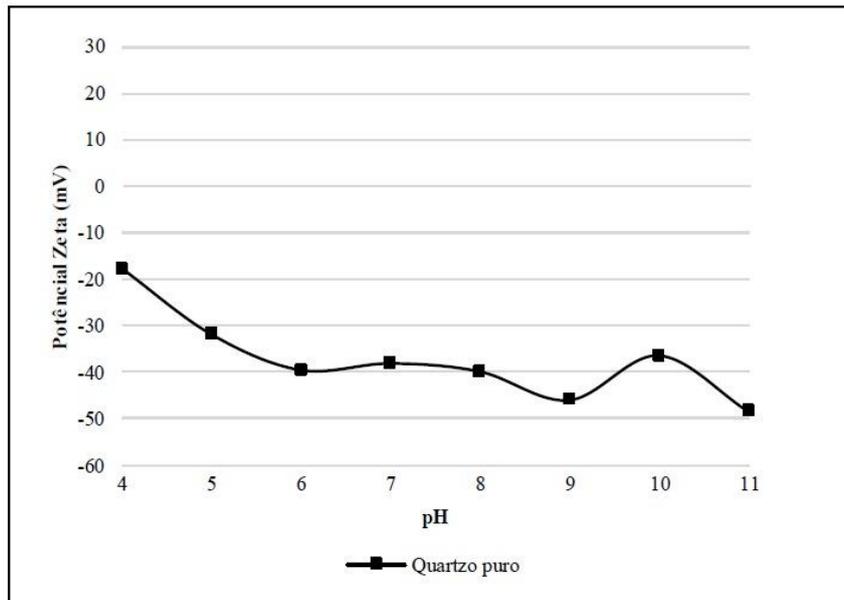


Figura 6 - Potencial zeta para quartzo puro.

Fonte: adaptado de Leite (2019).

4 MATERIAIS E MÉTODOS FAZER FLUXOGRAMA DE METODOLOGIA

4.1 Preparação e caracterização das amostras

A preparação e classificação das amostras minerais foi feita por Leite (2019), a metodologia consistiu em utilizar técnicas de catação manual e escrubagem, para uma pré seleção do material sem contaminantes na superfície e com maior pureza. Para adequação de tamanhos dos minerais puros de hematita e quartzo foi feita cominuição, de modo que aproximadamente 2 kg de cada material estivesse abaixo de 38 μ m, as amostras foram então homogeneizadas e quarteadas.

O granulômetro a laser (Cilas 1060) do Laboratório de Propriedades Interfaciais (DEMIN/UFOP) foi utilizado para análise granulométrica, da fração inferior a 38 μ m.

A composição mineralógica foi determinada por difração de raios X (XPRT3 - PanAlytical) do Laboratório de Microscopia Ótica e Difractometria de Raios X (DEMIN/UFOP).

A densidade do material foi aferida através de picnômetro a gás (Ultrapycnometer 1000) do Laboratório de Propriedades Interfaciais (DEMIN/UFOP).

4.2 Preparo da *Moringa oleífera*

O preparado da *Moringa oleífera* foi adaptado da metodologia feita por Oliveira (2016), primeiro a *Moringa oleífera* é descascada e colocadas em estufa por 30 minutos a 70°C, após esse período as sementes secas foram trituradas no liquidificador para obter o pó fino (Figura 5). Com isso feito, prosseguiu-se para o preparo da solução com concentração indicada de 1g de *Moringa oleífera* para 100mL de água destilada, sendo agitado por 2 minutos e com tempo de repouso de 150 minutos.



Figura 7 – Semente da *Moringa Oleífera* nas fases: com casca, sem casca e triturada.

Fonte: SILVA (2017)

4.3 Ensaio de Agregação

Os ensaios de agregação foram realizados em tubo de vidro de sedimentação no Laboratório de Análises Químicas (DEMIN/UFOP) com o reagente preparado a partir da *Moringa oleífera*. Para realização dos testes de agregação a metodologia utilizada foi adaptada de Orumwense e Nwachunkwu (2000), utilizando misturas de mineral puro e água destilada com 5% de sólidos, com volume total de 200mL em um tubo de dispersão. O ajuste do pH foi feito com soluções diluídas e concentradas de NaOH ou HCl nos valores de pH 5, 7 e 10. A dosagem utilizada para a solução *Moringa oleífera* foi de 2 mg/L. Foram realizadas duplicatas dos testes para minimizar erros individuais. O reagente de agregação preparado foi adicionado à polpa e permitiu-se condicionamento por 1 minuto através do agitador magnético. Para a polpa feita com quartzo utilizou-se o tempo de sedimentação de 4 minutos e para a polpa de hematita o tempo de sedimentação foi de 2 minutos, ambos obtidos segundo a lei de Stokes. Após a sedimentação o sobrenadante foi sifonado e a fração afundada foi recolhida, seca em estufa e pesada. Para o cálculo do grau de agregação (GA) sedimentado foi utilizado a equação 1:

$$GA(\%) = \left(\frac{m_{afundada}}{m_{total}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde:

- $m_{afundada}$ = massa afundada no sistema de dispersão;
- m_{total} = massa total inserida no teste.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização dos Minerais Puros Utilizados nos Ensaios

Os dados da distribuição granulométrica da amostra de hematita e quartzo preparada para os ensaios são exibidos no gráfico da figura 8.

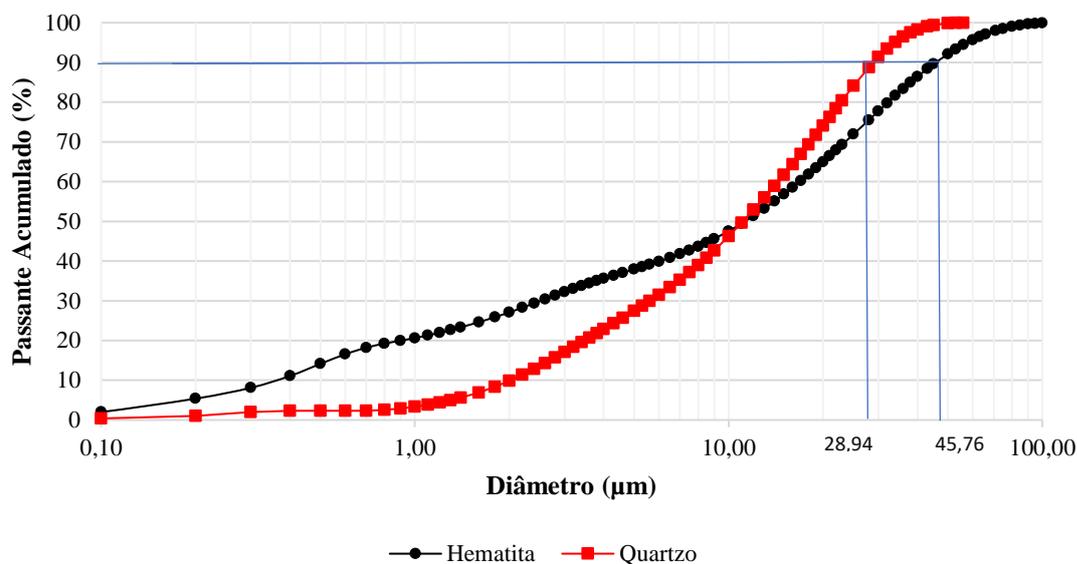


Figura 8 - Distribuição granulométrica da amostra de hematita e quartzo

Fonte: adaptado de Leite (2019)

O D90 da hematita encontrado foi de 45,76 μm . A densidade dos sólidos encontrada pela técnica do picnômetro a gás foi de 5,3g/cm³ (LEITE, 2019).

O D90 do quartzo encontrado foi de 28,94 μm . A densidade dos sólidos encontrada pela técnica do picnômetro a gás foi de 2,66g/cm³ (LEITE, 2019).

A figura 9, feita pelo difratômetro de raios X (DRX), mostra a composição mineralógica da hematita, que indica que a amostra possui a pureza necessária para os testes, 95,7% de hematita e 4,3% de quartzo (LEITE, 2019).

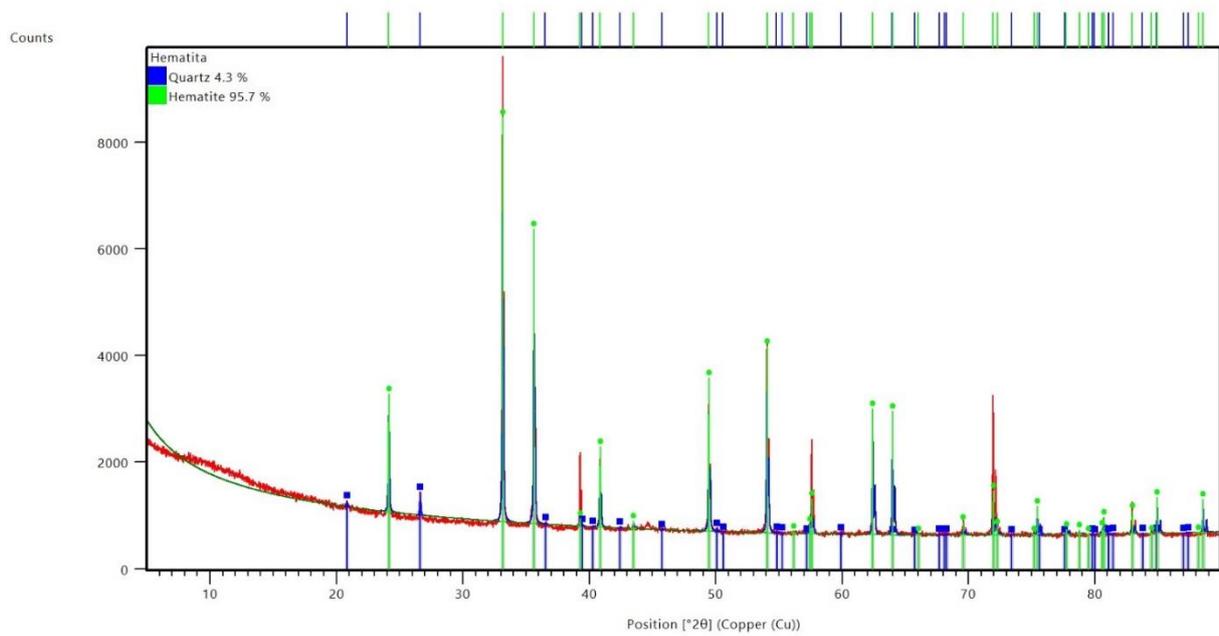


Figura 9 - Difratoograma da amostra de hematita.

Fonte: adaptado de Leite (2019)

A figura 10, feita pelo difratômetro de raios X (DRX), mostra a composição mineralógica do quartzo, indica que a amostra também possui pureza necessária para os testes, 100% de quartzo (LEITE, 2019).

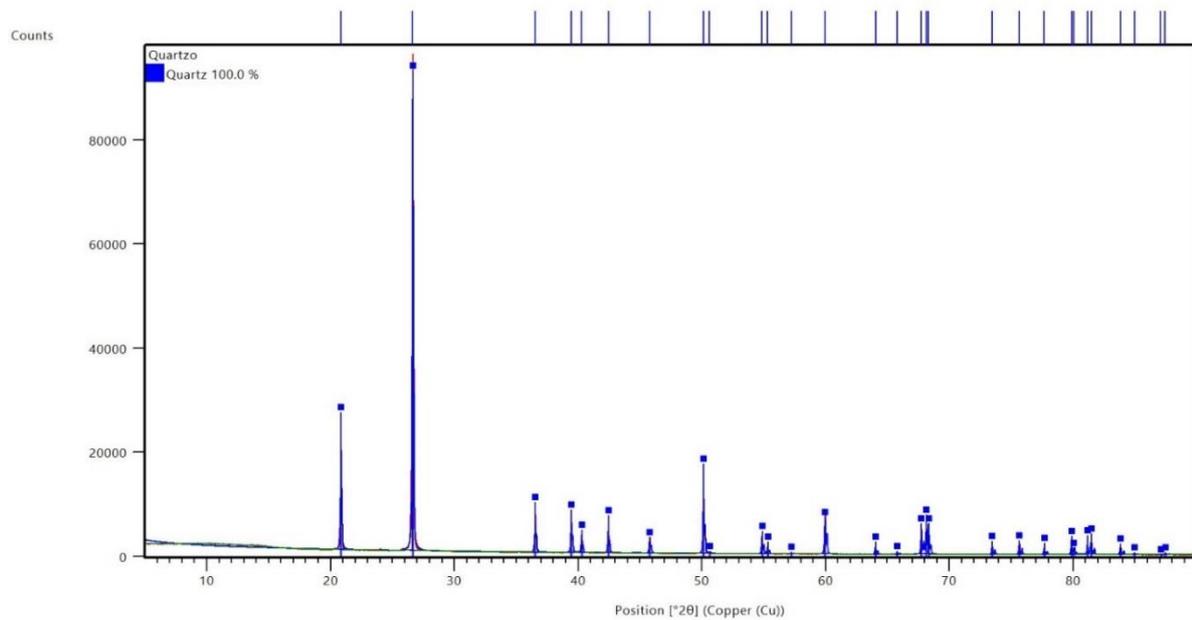


Figura 10 – Difratoograma da amostra de quartzo

Fonte: adaptado de Leite (2019)

5.2 Ensaio de Agregação

Os resultados obtidos para a *Moringa oleífera* usada como floculante na dosagem de 2 mg/L nos ensaios com o quartzo e com a hematita podem ser observados nas figuras 11 e 12, respectivamente. O gráfico 3 representa a comparação com os testes realizados por Leite (2019). COLOCAR BARRA DE ERRO

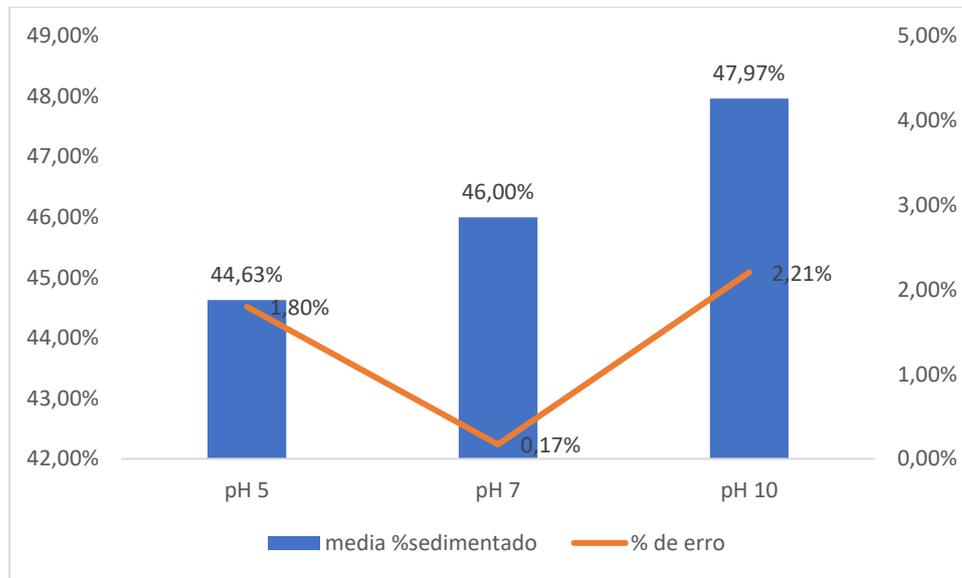


Figura 11 - Média de % sedimentado para cada faixa de pH do quartzo, com % de erro de duplicata.

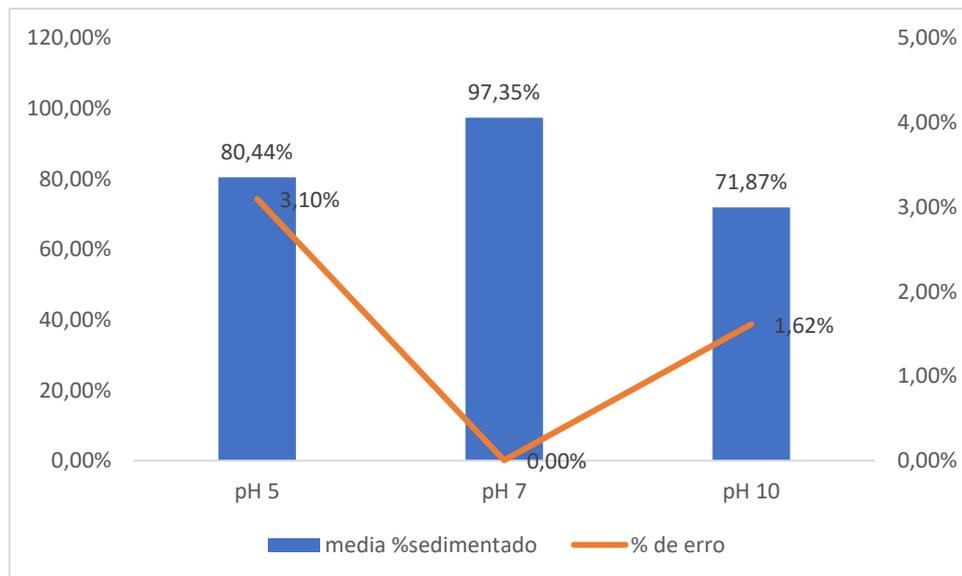


Figura 12 - Média de % sedimentado para cada faixa de pH da hematita, com % de erro de duplicata.

Observou-se que a hematita teve uma sedimentação consideravelmente melhor que a do quartzo utilizando a *Moringa oleífera* em todas as faixas de pH, a maior porcentagem de sedimentação foi para o pH 10 para o quartzo, mas mantendo uma média de aproximadamente 46% e a hematita teve a maior porcentagem de sedimentação na faixa de pH 7, chegando a até 97,35% de sedimentação.

Comparando com os resultados obtidos por Leite (2019) para poliacrilamida na faixa de pH 7 e testes sem nenhum reagente (branco), é possível observar que a *Moringa oleífera* tem desempenho similar ao floculante sintético. A poliacrilamida apresentou para o quartzo o valor de 38,24% na sedimentação e para a hematita o valor de 99,52% os testes em branco apresentaram os valores de 47,89% e 84,06% para os mesmos minerais respectivamente.

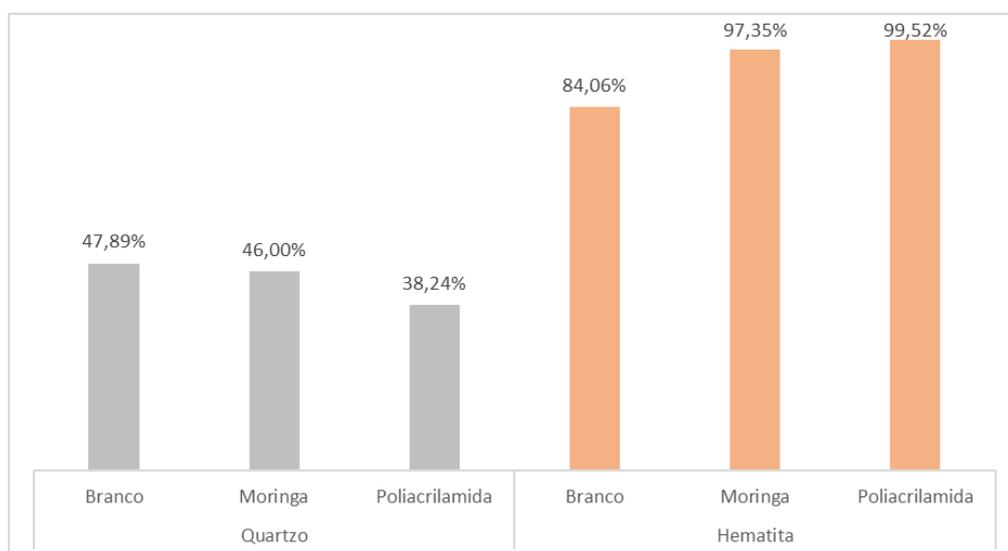


Figura 13 - Comparação dos testes em branco, do uso da poliacrilamida e da *Moringa oleífera* para quartzo e hematita no pH 7.

É possível notar que para o pH 7, tanto a *Moringa oleífera* quanto a poliacrilamida reduziram o valor de sedimentação do quartzo, em relação à sedimentação natural do sistema, e aumentaram esse valor para a hematita. Este comportamento pode indicar a utilização da *Moringa oleífera* como agente de agregação em processos de floculação seletiva, e com a realização de maiores estudos, uma possível substituta, sem toxicidade, para a poliacrilamida.

5.3 Potencial Zeta

Para medidas do potencial zeta da *Moringa oleífera* foram considerados os testes feitos por Magalhães (2014) que encontrou o valor de + 9,23 mV para o pH de 6,8. Este resultado auxilia na justificativa de que a *Moringa oleífera* possui maior facilidade para floculação da hematita devido ao baixo valor de potencial zeta de ambos, e valores opostos, nos valores de pH próximos de 7, o que pode favorecer uma redução mais efetiva nas cargas superficiais dos minerais de hematita presentes na suspensão. Já para o quartzo devido ao seu alto potencial zeta para os mesmos valores, faz com que o mesmo seja mais estável, dificultando a atuação da *Moringa oleífera* como agente floculante para esse mineral, sendo necessária avaliação em outros cenários, uma vez que a *Moringa oleífera* pode não ter conseguido desestabilizar as partículas de quartzo nas faixas de pH testadas.

6 CONCLUSÕES

A partir dos testes feitos utilizando a *Moringa oleífera* como agente de agregação natural foi possível avaliar seu uso em sistemas que contenham minerais de hematita e para o quartzo.

O valor de pH 7 para a hematita apresentou melhor resultado de sedimentação (97,35% de material sedimentado), enquanto que no mesmo valor de pH para o quartzo, o reagente apresentou desempenho de 46% em termos de material sedimentado. Este resultado da sedimentação das polpas de hematita e quartzo, pode indicar um bom resultado para separação desses dois bens minerais, o resultado em pH neutro é muito importante para observar que não a necessidade de ajuste de pH na utilização da *Moringa Oleífera*.

Comparando os resultados obtidos por LEITE (2019), para a poliacrilamida, é possível dizer que a *Moringa oleífera* apresenta um bom resultado para substituição desse agente flocculante, necessitando testes em mais cenários para comprovação.

Os resultados para o quartzo mostraram que a *Moringa Oleífera* não melhora o percentual de agregação desse mineral, trazendo a reflexão de uma possível seletividade em relação aos dois minerais testados.

Ao considerar o desempenho alcançado em pH 7 para as partículas minerais de hematita, é natural imaginar que pela proximidade com o ponto isoelétrico do mesmo e menor densidade de cargas nas partículas suspensas, essas encontrariam menor dificuldade para sedimentar. Porém o resultado foi superior ao valor obtido quando se observa a sedimentação natural destas partículas, situação que coloca a *Moringa oleífera* como potencial agente de agregação.

Porém ainda há uma necessidade da realização mais estudos para compreensão da eficácia e mecanismos de atuação da *Moringa oleífera* como agente de agregação de rejeitos de minério de ferro, além do uso do óleo extraído das sementes ou uma solução catalizadora, como testes em solução salina, para melhorar a velocidade da reação e entender melhor sua ação como coagulante/flocculante.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULKARIM, S.M.; LONG, K.; LAI, O.M.; MUHAMMAD, S.K.S.; GHAZALI, H.M. **Some physico-chemical properties of Moringa oleifera seed oil extracted using solvent and aqueous enzymatic methods.** FOOD CHEMISTRY, v. 93, p. 253–263, 2005

ARINAITWE, E.; PAWLIK, M. **A role of flocculant chain flexibility in flocculation of fine quartz. Part I. Intrinsic viscosities of polyacrylamide-based flocculants.** International Journal of Mineral Processing, v. 124, p. 50-57, 2013.

BEZERRA, C. G.; **Caracterização do rejeito de minério de ferro (IOT) e avaliação da sua influência no comportamento físico-químico e mecânico de pastas de cimento.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BRATBY, J. **Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment.** 2.ed. Londres: IWA Publishing, 2006.

CARVALHO, R. M. **Clarificação de águas pluviais ricas em óxidos de ferro acumuladas em cava de mineração através da utilização de um coagulante natural, a Moringa Oleífera.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

DIAS, C. L. P., SILVA, L. M., PERES, A. E. C., VALADÃO, G. E. S. **Utilização de reagentes auxiliares na filtragem.** REM – Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 57(4): p. 229 - 234, 2004.

GALEŠA, K.; BREN, U.; KRANJC, A.; MAVRI, J. **Carcinogenicity of Acrylamide: A Computational Study.** Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 56, n. 18, p. 8720-8727, 2008.

HAGMAR, L. et al. **Health Effects of Occupational Exposure to Acrylamide using Hemoglobin Adducts as Biomarkers of Internal Dose.** Scand J Work Environ Health, v. 27, n. 4, p. 219-226, 2001

IBRAM. **Mineração em Números,** 2021. Disponível em: < https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2022/02/Infografico_Mineracao_em-Numeros_2021-2.pdf >. Acesso: 30 jul. 2022.

JUNIOR, A. M. et al. **Influência da cal na filtragem e pelotamento**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 23., 2009, Gramado, RS. Porto Alegre: Palotti, 2009. p. 455-61.

LEITE, A. C. 2019. **Amidos Catiônicos na Floculação de Rejeitos da Deslamagem de Minério de Ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MACHADO, G. D. **Modificação química de taninos de *Acacia mearnsii* para obtenção de floculante livre de formaldeído**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

MAGALHÃES, E. R. B. **Avaliação de floculante natural à base de Moringa Oleífera no tratamento de água produzida na indústria do petróleo: aplicação da técnica combinada floculação/flotação**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

MALVERN INSTRUMENTS Ltd. **Malvern Instruments Zetasizer Nano Series User Manual**. Worcestershire, 2004.

MAPA, P.S. **Rota de processo para o underflow da deslamagem de minério de ferro do concentrador da Samarco Mineração**. 2006. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

NDABIGENGESERE A.; NARASIAH, K.S.; TALBOT, B.G. **Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using Moringa oleifera**. Water Research, v.29, n.2, p. 703-710, 1995.

NERI, V. C. C. **Acrilamida em Alimentos: Formação Endógena e Riscos à Saúde**. Programa de Pós-Graduação em Vigilância Sanitária Instituto Nacional de Controle de Qualidade em Saúde Fundação Oswaldo Cruz Rio de Janeiro: INCQS/FIOCRUZ, 2004.

OKUDA, T.; BAES, A.U.; NISHIJIMA, W.; OKADA, M. **Isolation and characterization of coagulant extracted from Moringa oleifera seed by salt solution**. Water Research, v.35, n.2, p.405-410, 2001.

OLIVEIRA, A. V.. **Avaliação de agentes auxiliares no tratamento do efluente da fabricação de ferro-ligas de manganês.** 2016. Monografia (Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

OLIVEIRA NT, NASCIMENTO KP, GONÇALVES BO, LIMA FC, COSTA ALN.; **Tratamento de água com Moringa oleífera como coagulante/floculante natural.** Rev Cient Fac Educ e Meio Ambiente.

ORUMWENSE, F. F. O.; NWACHUKWU, J. C. **Flocculation studies on hematite-silica system using polymeric flocculants.** Indian Journal of Chemical Technology, v. 7, p. 23-29, 2000.

PAVANELLI, G.. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada.** 2001. 233f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

RAMACHANDRAN, C.; PETER, K.V.; GOPALAKRISHNAN, P. K. **Drumstick (Moringa oleífera) a multipurpose Indian vegetable.** Economic Botany. v. 34, n.3, p. 276–283. 1980.

RENAULT, F.; Sancey, B.; Badot, P.-M.; Crini, G. **Chitosan for coagulation/ flocculation processes - An eco-friendly approach.** European Polymer Journal, v. 45, 2009.

REYNOLDS T. **Acrylamide and Cancer: Tunnel Leak in Sweden Prompted Studies.** Journal of National Cancer Institute, v. 94, n. 12, p. 876-878, 2002

SILVA, A. M.; **Avaliação de Agentes Auxiliares para o Tratamento de um Rejeito de Minério de Ferro.** 2017. Monografia (Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

SILVA, G. F. D. et al. **Potencialidade da Moringa oleífera Lam.** 1ª. ed. São Cristóvão: UFS, v. IV, 2018.

SOMASUNDARAN, B. R. **Principles of flocculation, dispersion and selective flocculation.** In: Fine particles processing. Nova Iorque: American Institute of Mining, v. 2, 1980.

SOUZA, A. L. **Efeito da adição de cal hidratada na etapa de aglomeração das pelotas de minério de ferro produzidas pela Samarco S.A.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Tecnologia Mineral – Programa de PósGraduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SUN-YI HUANG, D. W. **Acrylamide Polymers**. Wiley Online Library, 2001.

VIEIRA, W. S.; **Compostos Naturais e Modificados na Flocculação de Finos de Quartzos**. 2019. Monografia (Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

WEIDEBORG, M. et al. **Environmental Risk of Acrylamide and Methacrylamide from a Grouting Agent used in the Tunnel Construction of Romeriksporten**, Norway, *Water Research*, v. 35, n. 11, 2001