

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Cecília Ribeiro Tourino Costa

**AVALIAÇÃO DA VELOCIDADE DE QUEDA E DO PROCESSO DE SEDIMENTAÇÃO DE
REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO**

Belo Horizonte
2024

Cecília Ribeiro Tourino Costa

**AVALIAÇÃO DA VELOCIDADE DE QUEDA E DO PROCESSO DE SEDIMENTAÇÃO DE
REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO**

Dissertação/tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Transporte de Sedimentos

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Zegarra Tarqui

Belo Horizonte
2024

C837a

Costa, Cecília Ribeiro Tourino.

Avaliação da velocidade de queda e do processo de sedimentação de rejeito de minério de ferro [recurso eletrônico] / Cecília Ribeiro Tourino Costa. - 2024.

1 recurso online (119 f.: il., color.) : pdf.

Orientador: Jorge Luis Zegarra Tarqui.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 117-119.

Bibliografia: f. 108-116.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Velocidade de queda - Teses. 4. Resíduos de mineração - Teses. 5. Transporte de sedimento - Teses. 6. Minérios de ferro - Teses. I. Tarqui, Jorge Luis Zegarra. II..Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Colegiado de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Avaliação da Velocidade de Queda e do Processo de Deposição do Rejeito de Minério de Ferro"

CECILIA RIBEIRO TOURINO COSTA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. JORGE LUIS ZEGARRA TARQUI - Orientador

Profa EDNA MARIA DE FARIA VIANA

Profa ANA LUIZA DE OLIVEIRA BORGES

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH Versão Final aprovada por

Profa. Priscilla Macedo Moura
Tarqui
Coordenadora

Prof. Jorge Luis Zegarra
Orientador

Belo Horizonte, 13 de agosto de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Ana Luiza de Oliveira Borges, Usuário Externo**, em 14/08/2024, às 08:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jorge Luis Zegarra Tarqui, Professor do Magistério Superior**, em 14/08/2024, às 11:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edna Maria de Faria Viana, Professora do Magistério Superior**, em 14/08/2024, às 11:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Coutinho de Paula, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 22/10/2024, às 14:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3445978** e o código CRC **25F45EA6**.

AGRADECIMENTOS

Início meus agradecimentos às instituições que foram fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação, a UFMG, CAPES, FAPEMIG e CNPQ, reconhecendo ainda o apoio do Centro de Pesquisas Hidráulicas CPH - UFMG e toda a equipe que garantiu acolhimento e bom humor nos intermináveis finais de semana de trabalho. Agradeço também a Anglo American Minério de Ferro Brasil pelo incentivo a pesquisa e à LOCTEST Laboratório de Geotecnia por oferecer, generosa e gratuitamente, os ensaios da pesquisa.

À TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos, que me proporcionou todo suporte aos estudos, além de possibilitar a convivência com profissionais inspiradores, minha sincera gratidão. Em especial, ao Aloysio Saliba, que não apenas é um grande entusiasta da pesquisa e do conhecimento, que além da técnica ensina sobre empatia e bondade.

Agradeço profundamente meu orientador, Prof. Dr. Jorge, pelas orientações, apoio, conhecimento e confiança depositada durante todo este processo acadêmico. Também gostaria de agradecer às contribuições da Prof. Dr.(a) Edna por todas as contribuições realizadas ao longo da pesquisa.

Sempre fundamentais, agradeço enormemente minha família, pelo suporte e paciência constantes, compreensão e amor incondicional. Minha mãe, Angela, que não mede esforços para realizar toda e qualquer ação para me ajudar e me alegrar. Meu pai, Fábio, cujos passos segui ao estudar o mesmo parâmetro utilizado em seu mestrado, reforçando escolhas certas. Meus irmãos que além da amizade, me ajudaram ativamente, Arthur, o artista da família, fabricou o aparato de provetos e Pedro, que virou noites em companhia. Meu amor e gratidão eternos a vocês.

A amizade sincera e o companheirismo foram essenciais para a realização deste trabalho. Agradeço aos amigos que, com sua compreensão e apoio. O meu muitíssimo obrigada a Bruna, Débora, Guilherme, Ana, Vinicius, Felipe, Raquel, Debs, Ann Sophie, Clara, Eric, Marina, Luisa, Sandra, Breno, Daniel, Juan, Gabriel, Queiroga e André.

“There is no remedy for love but to love more.”
— Henry David Thoreau

RESUMO

Na mineração, os estudos de transporte de sedimentos auxiliam na elaboração de projetos de contenção de sedimentos e estudos de ruptura hipotética. As incertezas nos estudos de mineração se originam do foco predominante das pesquisas em transporte de sedimentos ser concentrado na análise de sedimentos naturais fluviais. Portanto, procurou-se compreender as características do rejeito de minério de ferro segundo sua composição mineralógica e processos de beneficiamento que foi submetido que possam alterar o comportamento no transporte de sedimentos, principalmente no que concerne o processo de deposição. Dentre os parâmetros necessários para avaliação da sedimentação, o parâmetro velocidade de queda da partícula e a variação da velocidade para diferentes concentrações se destacam. Além disso, também é importante avaliar a forma como o sedimento é transportado em um escoamento e como ocorre a difusão. Portanto, a dissertação caracterizou o rejeito de minério de ferro filtrado proveniente de uma mina de Minas Gerais e um sedimento natural coletado no reservatório da PCH de Salto do Paraopeba, e estimou a velocidade de queda da partícula a partir da análise de imagens de uma coluna de decantação e a variação da velocidade para diferentes concentrações para a parcela fina (silte e argila) do rejeito com o ensaio de provetas. A pesquisa também iniciou a avaliação do processo de sedimentação do rejeito em um canal para condições de escoamento e concentração constantes. A amostra de rejeito é formada por uma areia fina siltosa com a fração arenosa composta majoritariamente por sílica, com massa específica de $2,70 \text{ g/cm}^3$ e a fração fina por ferro e sílica, com $4,00 \text{ g/cm}^3$. Já o sedimento natural é composto por sílica, alumínio e ferro, com massa específica de $2,90 \text{ g/cm}^3$, ambos obtidos por análise de EDS-MEV. Além disso, a forma e a arredondamento das partículas foram estimadas por meio de imagens do ensaio de microscopia, que resultou em um Sf próximo a 0,4 e 0,6 e um P próximo a 2,2 e 2,1, para o rejeito e para o sedimento natural, respectivamente. Os resultados de velocidade de queda da partícula do sedimento natural foi superior ao do rejeito para a parcela arenosa, relacionado a menor massa específica do rejeito e sua forma mais angulosa. A equação que indicou melhor aderência foi desenvolvida por Cheng (1997) para ambos materiais. Demais equações indicaram resultados satisfatórios referente aos coeficientes de N-S e RMSE. Já o ensaio de provetas indicou o comportamento de redução da velocidade de queda com o aumento da concentração, sendo a equação de Hwang (1989) a que melhor descreveu o comportamento. Em um canal experimental, foi observada a formação de uma corrente de densidade e a deposição do rejeito ao longo do canal, identificando a formação de vórtices, cabeça e corpo da corrente. A eficiência de retenção do canal foi melhor estimada pela equação de Chen (1975). Conclui-se que a caracterização do sedimento, incluindo granulometria, massa específica e origem, é fundamental para a aplicação de equações de transporte de sedimentos. Além dos fatores como temperatura da água, concentração e condições de escoamento.

Palavras-chave: rejeito de minério de ferro; velocidade de queda; transporte de sedimentos.

ABSTRACT

In mining, sediment transport studies aid the design of sediment containment structures and hypothetical dam break studies. Uncertainties in mining studies arise from the predominant focus of sediment transport research, which is concentrated on the analysis of natural river sediments. Therefore, It is necessary to understand the characteristics of iron ore tailings, according to their mineralogical composition and the beneficiation processes to which they were subjected, that may alter their behavior in sediment transport, mainly concerning the deposition process. Among the parameters necessary for evaluating sedimentation, the particle settling velocity (ω_s) and the velocity variation for different concentrations (ω_c) stand out. In addition, it is also essential to evaluate how the sediment is transported in a flow and how diffusion occurs. Therefore, this dissertation characterized filtered iron ore tailings from a mine in Minas Gerais and natural sediment from the Salto do Paraopeba PCH reservoir. It estimated the particle settling velocity from the analysis of images of a settling column and the variation of velocity for different concentrations for the fine fraction (silt and clay) of the tailings with the graduated cylinder test. The research also evaluated the tailings sedimentation process in a channel under constant flow and concentration conditions. The tailings sample consists of fine silty sand with a sandy fraction composed mainly of silica, with a specific mass of $2,70 \text{ g/cm}^3$, and a fine fraction of iron oxides and silica, with $4,00 \text{ g/cm}^3$. The natural sediment comprises silica, aluminum, and iron, with $2,90 \text{ g/cm}^3$ obtained by EDS-MEV analysis. In addition, the shape and roundness of the particles were estimated through images from the microscopy test, which resulted in an S_f close to 0.4 and 0.6 and a P close to 2.2 and 2.1 for the tailings and the natural sediment, respectively. The results of the particle settling velocity of the natural sediment were higher than those of the tailings for the sandy fraction, related to the lower specific mass of the tailings and their more angular shape. The equation that indicated the best fit was developed by Cheng (1997) for both materials. Other equations indicated satisfactory results regarding the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient and RMSE. The graduated cylinder test indicated a behavior of decreasing settling velocity with increasing concentration, with the Hwang (1989) equation being the one that best described the behavior. In an experimental channel, the formation of a density current and the deposition of tailings along the channel were observed, identifying the formation of the current's vortices, head, and body. Chen's equation (1975) best estimated the channel retention efficiency. It was concluded that sediment characterization, including grain size distribution, specific mass, and origin, is fundamental for applying sediment transport equations and factors such as water temperature, concentration, and flow conditions.

Keywords: iron ore tailings; fall velocity; sediment transportation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática dos parâmetros de uma corrente de densidade.....	31
Figura 2 – Coeficiente de arrasto (C_d) versus Reynolds da Partícula, nos ramos de Stokes, Newtoniano e de transição.	34
Figura 3 - Desenho esquemático de estimativa do arredondamento da partícula para imagens bidimensionais.	38
Figura 4 - Classificação da Redondeza de uma partícula.	39
Figura 5 - Comparação entre equações de velocidade de queda por diversos autores.	42
Figura 6 - Relação entre concentração de sólidos em suspensão e velocidade de queda.	43
Figura 7 - Diferentes tipos de rejeitos, seus aspectos e tipos de depósito.	48
Figura 8 - Distribuição granulométrica de diferentes tipos de rejeitos de algumas minerações do Quadrilátero Ferrífero.	50
Figura 9 - Fluxograma do beneficiamento da mina.	53
Figura 10 - Exemplo da obtenção dos eixos das partículas através das imagens do MEV de rejeito de minério de ferro.	57
Figura 11 - Exemplo da obtenção da esfericidade da partícula (P) através das imagens do MEV – rejeito de minério de ferro.	58
Figura 12 - Foto do aparato experimental utilizado para a determinação da velocidade de queda das partículas.	60
Figura 13 - Determinação da velocidade queda no <i>software</i> Tracker – Rejeito de minério de ferro (0,250 mm e 0,150 mm).	62
Figura 14 - Ensaio de Velocidade de queda com provetas.	64
Figura 15 – Análise de velocidade de queda entre (a) o tempo inicial após a mistura homogênea até atingir: (b) a parcela de rejeito acinzentada e (c) clarificação total.	64
Figura 16 - a) Aparato experimental composto por um canal retangular, bomba centrífuga, registro de gaveta, medidor de vazão eletromagnético e reservatórios, b) Detalhe do procedimento experimental da sedimentação no canal.	67
Figura 17 - Coleta do sedimento depositado no canal.	69
Figura 18 - Teor de Sílica (SiO_2) e Ferro (Fe) nas diferentes frações granulométricas do rejeito de minério de ferro.	70

Figura 19 - Cores das amostras de rejeito de minério de ferro em diferentes subclasses granulométricas.....	71
Figura 20 - Curvas granulométricas do rejeito filtrado.....	71
Figura 21 – Partículas do sedimento da PCH de Salto do Paraopeba com presença significativa de sílica e traços de alumínio e/ou ferro.	73
Figura 22 – Partículas do sedimento da PCH de Salto do Paraopeba com presença predominante de Si e com presença de mais marcante de Al e Fe e traços de outros minerais.....	74
Figura 23 – Partículas do sedimento da PCH de Salto do Paraopeba com presença predominante de Si, Al, seguido de Fe, Ti, K, Mg e Ca.....	74
Figura 24 - Imagem de Microscópio de Varredura do sedimento da PCH de Salto do Paraopeba na faixa granulométrica 0,075 mm e 0,500 mm (65x).....	75
Figura 25 - Imagem de Microscópio de Varredura do Rejeito de minério de Ferro nas faixas granulométricas entre 0,300 mm e 0,500 mm (65x).	76
Figura 26 - Imagem de Microscópio de Varredura do Rejeito de minério de Ferro nas faixas granulométricas entre 0,150 mm e 0,300 mm (65x).	76
Figura 27 - Imagem de Microscópio de Varredura do Rejeito de minério de Ferro nas faixas granulométricas entre 0,063 mm e 0,150 mm (120x).	77
Figura 28 - Imagem de Microscópio de Varredura do Rejeito de minério de Ferro na faixa granulométrica < 0,063 mm (350x).....	77
Figura 29 - Velocidade de queda obtida para sedimento do reservatório da PCH de Salto do Paraopeba.....	79
Figura 30 - Velocidade de queda média para o sedimento da PCH do Salto do Paraopeba.....	80
Figura 31 - Velocidade de queda obtida para a areia e rejeito de minério de ferro (cm/s).	82
Figura 32 - Comparação dos resultados obtidos para o Rejeito de minério de ferro.	84
Figura 33 - Comparação dos resultados obtidos para o sedimento da PCH de Salto do Paraopeba.....	85
Figura 34 – Resultado da comparação das equações de velocidade de queda que consideram os parâmetros de fator de forma e a redondeza da partícula estimados e padronizados ($S_f = 0,7$ e $P = 3,5$).....	86
Figura 35 - Resultados obtidos da variação da velocidade de queda com a concentração volumétrica da parcela acinzentada do rejeito.....	88

Figura 36 - Resultados obtidos da variação da velocidade de queda (m/s) com a concentração volumétrica (%) da parcela acinzentada do rejeito	90
Figura 37 - Comparação dos resultados obtidos da variação da velocidade de queda (m/s) com a concentração da parcela acinzentada do rejeito com equações desenvolvidas empiricamente.	93
Figura 38 - Comparação dos resultados obtidos da variação da velocidade de queda com a concentração volumétrica de rejeito até a clarificação total da mistura com equações desenvolvidas empiricamente.....	94
Figura 39 – Ocorrência de difusão no ensaio de sedimentação em repouso.....	95
Figura 40 - Relação de massa de rejeito de minério de ferro na faixa granulométrica 0,125 mm a 0,090 mm depositada ao longo do canal.....	96
Figura 41 – Formação de vórtice na entrada do canal.....	97
Figura 42 – Identificação dos parâmetros da corrente de densidade formada no canal.	98
Figura 43 - Deposição de rejeito de minério de ferro na faixa granulométrica 0,125 mm a 0,090 mm no canal com lançamento de 200 g no início do escoamento (fotos a cada segundo).	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equação velocidade de queda da partícula obtida por diferentes autores.	36
Tabela 2 - Arredondamento de uma partícula.....	39
Tabela 3 - Equação velocidade de queda da partícula que incorporam fator de forma e redondeza da partícula.....	40
Tabela 4 - Equações de velocidade de queda para diferentes concentrações.	44
Tabela 5 - Comparação entre consistências do rejeito, tecnologias de desagamento, transporte e formas de disposição.	49
Tabela 6 - Características do rejeito das barragens de Fundão e B-I.	51
Tabela 7 - Faixas granulométricas adotadas para os ensaios de velocidade de queda.	54
Tabela 8 - Característica da amostra de areia coletada no reservatório da PCH de Salto do Paraopeba.....	55
Tabela 9 – Concentrações definidas para ensaio de provetas.....	63
Tabela 10 – Condições definidas para o ensaio de deposição de sedimentos em um canal.....	68
Tabela 11 - Massa específica do rejeito de minério de ferro filtrado.	72
Tabela 12 - Fator de forma e esfericidade estimada para o rejeito de minério de ferro e sedimento da PCH de Salto do Paraopeba.....	78
Tabela 13 - Comparação dos resultados obtidos para o sedimento da PCH de Salto do Paraopeba e para o Rejeito de minério de ferro.....	83
Tabela 14 - Resultados obtidos para a variação da velocidade de queda (m/s) com a concentração volumétrica (%) da parcela acinzentada do rejeito.	87
Tabela 15 - Resultados obtidos da variação da velocidade de queda com a concentração volumétrica de rejeito até a clarificação total da mistura.....	89
Tabela 16 – Parâmetros utilizados nas equações selecionadas para estimativa da velocidade de queda (ωc).	91
Tabela 17 – Comparação dos resultados obtidos da variação da velocidade (m/s) de queda com a concentração de rejeito de minério de ferro para a parcela acinzentada com equações desenvolvidas empiricamente.	92

Tabela 18 – Comparação dos resultados obtidos da variação da velocidade de queda (m/s) com a concentração de rejeito de minério de ferro para a clarificação total da mistura com equações desenvolvidas empiricamente.	93
Tabela 19 – Análise da eficiência de retenção do canal.	100
Tabela 20 – Avaliação da corrente de densidade.	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANM	Agência Nacional de Mineração
AAMFB	Anglo American Minério de Ferro Brasil
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CPH	Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva de raios-X
g	Aceleração da gravidade (m/s ²)
K_s	Altura de rugosidade
A_s	Área transversal do grão (m ²)
C_D	Coeficiente de arrasto
C_v	Concentração de sólidos volumétrica (%)
C	Concentração de sólidos mássica (g/L)
I	Declividade (m/m)
ρ_s	Massa específica da partícula (g/m ³)
ρ_m	Massa específica da mistura (g/cm ³)
ρ_w	Massa específica do fluido (g/cm ³)
Q_{bv}	Descarga de sedimento unitária
d_*	Diâmetro adimensional da partícula
d_{50}	Diâmetro mediano (m)
d_n	Diâmetro nominal (m)
d_s	Diâmetro da partícula (m)

$l_a, l_b \text{ e } l_c$	Dimensões da partícula (m)
F_D	Força de arrasto
F_p	Força peso
G_s	Gravidade específica
P	Índice de redondeza
F_r	Número de Froude
Re_p	Número de Reynolds da partícula
R_i	Número de Richardson
S_f	Parâmetro de forma de Corey
γ_s	Peso específico do sedimento (N/m ³)
γ_w	Peso específico do fluido (N/m ³)
γ_m	Peso específico da mistura (N/m ³)
y_h	Profundidade hidráulica (m)
R_h	Raio hidráulico (m)
τ_y	Tensão de cisalhamento (N/m ²)
Q_s	Vazão de sólidos
Q_w	Vazão (m ³ /s)
u_*	Velocidade de atrito crítico
ν	Viscosidade cinemática (m ² /s)
ω_s	Velocidade de queda da partícula (m/s)
ω_c	Velocidade de queda de finos (m/s)
μ	Viscosidade dinâmica do fluido (Ns/m ³)
ω_h	Velocidade de queda - fluido não newtoniano (m/s)
μ_m	Viscosidade dinâmica da mistura (Ns/m ³)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVOS	22
2.1	Objetivo Geral	22
2.2	Objetivos Específicos	22
3	REVISÃO DA LITERATURA	23
3.1	Transporte de sedimentos	23
3.2	Processo de Sedimentação em reservatórios	25
3.3	Velocidade de Queda	32
3.3.1	Velocidade de queda da partícula	32
3.3.2	Velocidade de queda para diferentes concentrações	42
3.4	Rejeito de minério de ferro	46
3.4.1	Beneficiamento do minério de ferro	46
3.4.2	Características do rejeito de minério de ferro	50
4	MATERIAL E MÉTODOS	52
4.1	Caracterização das amostras	52
4.1.1	Rejeito de minério de ferro	52
4.1.2	Sedimento do reservatório da PCH de Salto do Paraopeba	54
4.1.3	Fator de forma e esfericidade do sedimento	56
4.2	Velocidade de queda	58
4.2.1	Velocidade de queda da partícula	58
4.2.2	Velocidade de Queda para diferentes concentrações	63
4.2.3	Teste de aderência para equações de Velocidade de Queda	64
4.2.4	Deposição do Rejeito de minério de ferro em um canal	65
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
5.1	Caracterização das amostras	70
5.1.1	Rejeito de minério de Ferro	70
5.1.2	Sedimento do reservatório da PCH de Salto do Paraopeba	73
5.1.3	Fator de forma e esfericidade das partículas	75
5.2	Velocidade de queda da partícula	79
5.3	Velocidade de queda para diferentes concentrações das frações finas	87
5.4	Deposição do rejeito em escoamento	96
6	CONCLUSÕES	102
7	RECOMENDAÇÕES	107
	REFERÊNCIAS	108

APÊNDICE A – Fator de forma e Esfericidade das partículas de rejeito de minério de ferro e do sedimento do reservatório da PCH de Salto do Paraopeba.....	117
---	-----

1 INTRODUÇÃO

A gestão adequada da geração e transporte de sedimentos ainda é um grande desafio que pode implicar em impactos econômicos, ambientais e sociais. Estudos relacionados ao transporte de sedimentos são considerados complexos devido à multivariada relação entre áreas diversas da ciência como geologia, geotecnia, hidráulica, oceanografia, agronomia, entre outros.

Os métodos de controle de sedimentos na fonte, para evitar primeiramente a sua geração, são considerados os mais efetivos como métodos de conservação e manejo do solo. No entanto, a partir de condições em que o processo de transporte já está ocorrendo, diversas medidas podem ser realizadas para contenção de sedimentos, como construção de barreiras físicas.

Na mineração, por exemplo, os sedimentos gerados pelos processos minerários e por processos erosivos pela ação do vento ou da água em áreas de solo exposto como pátios, acessos, pilhas de escória, estéril e mais recentemente, pilhas de rejeito filtrado, são comumente direcionados para diques de contenção de sedimentos ou *sumps*. Estima-se que as áreas ocupadas por atividade de mineração, apresentem taxas de geração de sedimentos variando entre 300 m³/ha.ano e 600 m³/ha.ano, conforme análise de empreendimentos dos Estados Unidos (EPA, 1976 apud PINHEIRO, 2011). Já Gomes (2012) apresenta um compilado de taxas médias entre 2004 e 2009 em pilhas de estéril em projetos da Vale de 250 m³/ha.ano a 2.000 m³/ha.ano. No caso de regiões naturais, a curva de Kosla indica uma taxa consideravelmente inferior, entre 100 t/km².ano e 600 t/km².ano (PINHEIRO, 2011).

Portanto, é de grande importância o devido dimensionamento das estruturas de contenção de sedimentos. A definição técnica dessas estruturas baseiam-se usualmente em equações desenvolvidas para sedimentos naturais, como os estudos de Brune e Churchill (BRUNE, 1953; CHURCHILL, 1948 apud JULIEN, 2010), o que levanta o questionamento da aplicabilidade para sedimentos provindos da atividade minerária.

Além disso, com o aumento da produção mineral, a geração de resíduos (estéreis e rejeitos) também se intensifica, demandando estruturas de armazenamento cada vez maiores, como pilhas e barragens (GALVÃO-SOBRINHO, 2014). Segundo Guimarães *et al.* (2011), a exploração de jazidas com menor teor metálico agrava ainda mais essa tendência. Diante disso, é evidente a necessidade de adoção de práticas assertivas para garantir o manejo adequado de sedimentos.

Além das práticas de manejo, os eventos de ruptura recentes da Barragem de Fundão em Mariana em 2015 e da Barragem B-I em Brumadinho em 2019 também destacaram a necessidade de compreensão do transporte fluvial do rejeito de minério de ferro. Os impactos observados entre as rupturas foram distintos entre si. O rompimento da barragem de rejeitos da Mina do Fundão em novembro de 2015 resultou em 19 mortes e a onda de inundação hiperconcentrada atingiu uma extensão de 670 km até a foz do rio Doce no Oceano Atlântico, registrando, após a confluência do Rio do Carmo e o Rio Doce, uma concentração de sólidos em suspensão de 400 g/L (PALU; JULIEN, 2019).

A ruptura da Barragem B-I resultou em cerca de 270 mortes, teve maiores impactos notados no ribeirão Ferro-Carvão e nos primeiros 50 km a jusante de sua confluência com o rio Paraopeba, com efeitos na qualidade da água mais limitados. Referente às concentrações de sólidos em suspensão, o valor máximo medido após o evento foi de 130 g/L no ponto PT-09 em 04/02/2019, a 5,6 km da confluência entre o ribeirão Ferro-Carvão e o rio Paraopeba (ANDRADE *et. al.*, 2020). Conforme o monitoramento de concentrações de sólidos em suspensão total do IGAM, os dados da série histórica do primeiro trimestre nos últimos 10 anos indicaram o valor máximo de 1,50 g/L (Ponto BP071).

Destaca-se que ambas as rupturas resultaram em alterações reológicas do fluido e da dinâmica do transporte de sedimentos significativas nas áreas atingidas, indicando a necessidade de avaliação da incorporação dessas alterações nos estudos de ruptura hipotética de barragens de rejeitos.

A compreensão do comportamento do transporte fluvial de rejeitos em caso de rupturas de barragens auxilia na avaliação dos impactos nas condições do rio, sejam estes na qualidade de água, no ecossistema ou na morfologia do curso de água. Além disso, também contribui para a tomada de decisões importantes como operações de dragagem, construção de estruturas de retenção e mapeamento de plano de contingência para fornecimento de água, assim como para a avaliação de possível retorno das condições pretéritas do rio para liberação dos usos múltiplos de água.

Nesse sentido é preciso caracterizar o rejeito de minério de ferro, avaliar os principais parâmetros hidráulicos e compreender os processos de erosão, deposição e transporte. No que tange à deposição de sedimentos, importante fator na gestão de sedimentos das minas e no dimensionamento de diques de detenção de sedimentos, destaca-se o parâmetro hidráulico chamado velocidade de queda dos sedimentos, ou velocidade terminal.

Ainda que existam estudos de velocidade de queda de rejeito de minério de ferro, o foco principal da pesquisa foi a definição de dosagens de coagulantes e floculantes (HAN et al., 2022; TAN et al., 2022; VENTURA, 2018; ZHANG et al., 2020) para otimizar processos de reaproveitamento de água ou rebeneficiamento de rejeitos ultrafinos. Portanto, ainda falta na literatura a determinação de uma equação empírica para o rejeito de minério de ferro no que tange o transporte de sedimentos.

Dessa forma, a presente dissertação caracterizou uma amostra de rejeito de minério de ferro filtrado, avaliou experimentalmente a velocidade de queda da partícula para diferentes concentrações de rejeito e definiu as equações empíricas que melhor representam os fenômenos. Além de estabelecer, de forma preliminar, um método de estudo do processo de deposição do rejeito em um reservatório de contenção.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Determinação experimental da velocidade de queda de sedimento de rejeito de minério de ferro e estabelecer, de forma preliminar, um método para o estudo da sedimentação em um reservatório de contenção.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Determinar a velocidade de queda do material grosso do rejeito (fração areia) de minério de ferro filtrado em faixas granulométricas empregando uma coluna de decantação;
- Determinar a velocidade de queda para diferentes concentrações do material fino (frações silte e argila) do rejeito de minério de ferro filtrado mediante ensaio de provetas;

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Transporte de sedimentos

Os processos naturais de erosão, transporte e sedimentação têm moldado a configuração da superfície terrestre ao longo das eras geológicas. Contudo, a interação humana com o ambiente pode acelerar esses processos, causando problemas ambientais e impactando a engenharia de estruturas hidráulicas.

A erosão resultante da desagregação e remoção de partículas do solo ou fragmentos de rocha é complexa e influenciada por vários fatores. Agentes físicos como precipitação, escoamento e vento, assim como atividades humanas, e passivos como características geológicas e topográficas, desempenham papéis significativos na ocorrência da erosão. Além disso, os processos envolvidos no beneficiamento de minério, desde a fragmentação de rochas até a produção de minério, rejeitos e estéreis se destacam na geração de sedimentos.

Os materiais erodidos e/ou “fabricados” são transportados para os cursos de água pelos agentes erosivos. Tais sedimentos possuem diferentes tamanhos e formas e estão sujeitos a um processo de movimentação variável e fortemente influenciado pelas condições locais e de escoamento. García (2008) descreve os principais fatores que afetam o transporte dos sedimentos em um curso de água, quais sejam: tamanho da partícula, peso específico, forma, característica do escoamento, declividade do leito, forma do canal e temperatura da água.

Conceitualmente, o início do transporte de sedimentos ocorre quando a tensão de cisalhamento imposta pelo escoamento no leito fluvial excede um valor crítico, dando início ao movimento da partícula (SHIELDS, 1936 apud JULIEN, 2010). Vencida essa tensão crítica, o sedimento pode ser transportado em dois grandes modos, o transporte de fundo (ou por arraste) e o transporte em suspensão.

O transporte de sedimentos em suspensão ocorre quando a parcela de sedimentos em movimento é sustentada pelas componentes verticais ascendentes das correntes turbulentas e cujo peso próprio não é suficiente para sua sedimentação, sendo

transportadas pelos componentes horizontais destas velocidades (CARVALHO, 2008). Caracteriza-se por um processo interativo de variação contínua de partículas em uma seção, com etapas de deposição, ressuspensão e difusão horizontal e vertical.

Geralmente o transporte em suspensão é consideravelmente maior que o transporte por arraste e depende da capacidade de transporte do escoamento. O transporte de fundo pode ocorrer por arraste, saltação ou rolamento. A carga de sedimentos transportada por arraste está relacionada a resistência ao cisalhamento e à velocidade de queda do sedimento (ω_s), sendo esta, superior às variações turbulentas do fluxo ascendente (JULIEN, 2010). O transporte de fundo apresenta papel fundamental na formação do leito e nas mudanças morfológicas de um rio.

A quantificação e compreensão do transporte de sedimentos no escoamento é bastante complexa devido à grande heterogeneidade do próprio sedimento e das condições de fluxo. Portanto, para realizar a quantificação direta do transporte de sedimentos mediante medições de descarga sólida, seria necessária uma quantidade significativa de dados de campo. No entanto, devido a questões ligadas ao custo e logística na realização das campanhas de medição de descarga sólida, frequentemente opta-se pelo emprego de equações indiretas.

As equações indiretas de transporte de sedimentos partem das equações de Navier-Stokes para fluidos compressíveis e conservação da massa considerando o transporte advectivo, dispersivo, difusivo e mistura turbulenta (JULIEN, 2010). Destaca-se que, até o presente momento, as equações completas de Navier-Stokes não apresentam solução analítica (CAMPERA, 2020), e utilizam, portanto, simplificações de incompressibilidade do fluido e viscosidade constante.

Para o cálculo, as equações primárias são adaptadas ao formato padrão, com a equação de transporte da variável de interesse ϕ . Trata-se dos termos de tempo, advectivo, difusivo e fonte (Eq. (1)), respectivamente. Para representar diferentes equações de conservação, alteram-se apenas os componentes: variável ϕ , coeficiente de difusão Γ e termo de fonte S .

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \text{div}(\Phi \mathbf{u}) = \frac{1}{\rho} \text{div}(\Gamma(\nabla \Gamma \Phi)) + S_\Phi \quad (1)$$

Palu e Julien, (2019) descreveram o transporte de sedimentos a partir de um modelo unidimensional considerando o acoplamento das equações de advecção e dispersão, conforme Eq (2) (FISCHER *et al.*, 1979; RUTHERFORD, 1994; CHANSON, 2004; CHAPRA, 2008; JULIEN 2018 apud PALU; JULIEN, 2019).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \underbrace{-U \frac{\partial C}{\partial x} - kC}_{\text{Advecção}} + \underbrace{K_d \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}}_{\text{Dispersão}} \quad (2)$$

Em que, C é concentração (mg/L) no tempo t (s) e na distância x (m) a partir do ponto de emissão, U é a velocidade média no trecho de propagação (m/s), K_d é o coeficiente longitudinal de dispersão (m²/s) e k é coeficiente de deposição de sedimentos (1/s), que está relacionada com a ω_s a velocidade de queda do sedimento e a profundidade do escoamento.

3.2 Processo de Sedimentação em reservatórios

O transporte de sedimentos em calhas fluviais é considerado bastante dinâmico, com processos interativos entre suspensão, sedimentação, ressuspensão, saltação, rolamento e arraste. A construção de reservatórios ou *ponds* altera a dinâmica do fluxo, reduzindo a velocidade do escoamento, favorecendo a sedimentação.

O comportamento de sedimentos em reservatórios é variável de acordo com a energia disponível para o transporte destes. Se a energia for suficiente para o transporte de carga sólida, o fundo do rio permanece em condições estáveis. Caso haja aumento desta energia, ocorrerá erosão das margens e do fundo do rio, transportando a carga sólida e contribuindo para o seu aumento à jusante. Porém, se a energia for menor, parte da carga sólida será depositada no leito do rio (OLIVEIRA; BRITO, 1998 apud MINHONI, 2013).

A deposição e distribuição dos sedimentos nos reservatórios e a formação do assoreamento é função de diversos fatores, como a forma geométrica do reservatório,

a topografia da região, a sinuosidade do curso d'água, a granulometria dos sedimentos, o tipo de operação do reservatório, a vazão afluente, e outros (CARVALHO, 2008). Além disso, cita-se a velocidade de queda do sedimento (ω_s) e todos os parâmetros que influenciam o seu valor, como a densidade, diâmetro e forma do sedimento, da viscosidade da mistura e concentração.

Julien (2010) descreveu o processo de sedimentação de forma simplificada considerando a entrada de sedimentos em um único pulso de concentração e vazão de entrada constante, conforme descrito na Equação (3).

$$C_i = C_{oi} e^{-\frac{X\omega_{si}}{hU}} \quad (3)$$

Sendo, C_{oi} a concentração de sedimento na entrada do reservatório (distância $X=0$) e C_i a concentração de sedimentos na distância X , ω_{si} a velocidade de queda do sedimento (m/s) de fração granulométrica i , h a profundidade do escoamento (m) e U é a velocidade média no trecho de propagação (m/s). A equação consegue prever o decaimento da concentração em um reservatório, desconsiderando processos de turbulência.

Outro conceito bastante utilizado é a eficiência de retenção (T_{Ei}) de sedimentos em um reservatório definido por Strand (1974 apud TAN et al., 2019) como a razão entre a quantidade de sedimento depositado e o fluxo total afluente (Equação (4)).

$$T_{Ei} = \frac{C_{oi} - C_i}{C_{oi}} \quad (4)$$

Sendo, C_{oi} a concentração de sedimento na entrada do reservatório e C_i a concentração de sedimentos efluentes. Os métodos empíricos são os principais aplicados na determinação da eficiência de retenção dos sedimentos (BROWN, 1944; BRUNE, 1953; CHURCHILL, 1948; HEINEMANN, 1981; WARD, 1980).

O método de Brown relaciona a eficiência de retenção com a capacidade de armazenamento do reservatório e área de contribuição da bacia, obtido através da

análise de 15 reservatórios. No entanto, Brune (1953) observou que bacias com a mesma relação de volume e área de contribuição podem apresentar uma variabilidade elevada de eficiência de retenção. Assim, incluiu na análise o deflúvio anual para contabilizar a variabilidade das características hidrológicas da área de drenagem, com dados obtidos em 44 reservatórios. Já Churchill (1948) propôs a relação entre sedimentos passantes em um reservatório e um índice de sedimentação. O índice é obtido através do tempo de detenção de um reservatório pela velocidade média, incorporando o comportamento hidráulico do mesmo.

No entanto, as equações empíricas mencionadas foram definidas com dados de grandes reservatórios. Portanto, no caso de pequenos reservatórios, definidos por áreas de contribuição inferiores a 60 km² por GU *et al.*, (2017), as equações definidas por Heinemann, (1981) e Ward, (1980) ou equações teóricas, são mais representativas. Heinemann (1981) analisou 20 pequenos *sumps* agrícolas (bacias escavadas no solo) de 3x10³m³ a 4x10⁶m³ e áreas de contribuição entre 0,8 km² e 36,3 km², que apresentaram eficiência de retenção inferior ao estabelecido por Brune (1953). As equações de Ward (1980) foram desenvolvidas levando em consideração a capacidade do reservatório, o volume de entrada, a distribuição do tamanho das partículas, o tempo de detenção, a duração da tempestade e as taxas de pico de entrada e saída. Além de estabelecer equações específicas para as condições do reservatório: seco, com lagoa permanente com e sem fluxo de base. No entanto, a aplicação da equação requer vários dados de entrada recorrentemente não disponíveis.

Um modelo teórico para retenção de sedimentos foi desenvolvido por Camp (1945 apud GU *et al.*, 2017), considerando um tanque de fluxo contínuo retangular, mistura completa de água e sedimentos, e nenhuma ressuspensão de sedimentos. Ele definiu uma velocidade crítica de deposição (ω_c) que permite que as partículas se depositem antes de saírem do tanque, conforme Equação (5).

$$\omega_c = \frac{hUb}{Lb} = \frac{Q}{A_t} \quad (5)$$

Em que h a profundidade do escoamento (m), b a base do tanque (m), L o comprimento do tanque (m) a Q é a vazão (m³/s) e A_t é área superficial do tanque (m²). Para partículas com velocidade de queda (ω_s) maior ou igual à velocidade crítica (ω_c), a eficiência de retenção (TE) é 100%. Para partículas com (ω_s) menor que (ω_c), a TE é a razão entre (ω_s/ω_c). Chen (1975 apud GU *et al.*, 2017) modificou o modelo de Camp (1945) introduzindo um fator de turbulência que leva em conta a difusividade da turbulência e a velocidade de deposição das partículas. A eficiência de retenção (TE) de Chen (1975) é dada pela Equação (6).

$$T_E = 100\% \left[1 - e^{-\frac{\omega_s}{\omega_c}} \right] \quad (6)$$

No modelo SWMM, Huber e Dickinson, (1988) incorporaram o fator adimensional de turbulência α (Eq. (8)) na equação eficiência de retenção TE (Eq. (7)).

$$T_E = 100\% \left[1 - e^{-\frac{\omega_s}{\omega_c}} \right] + \frac{\ln \alpha - \ln 0,01}{\ln 1 - \ln 0,01} \left(T_{ECamp} - 100\% \left[1 - e^{-\frac{\omega_s}{\omega_c}} \right] \right) \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{\omega_s}{1,5u_*} \quad (8)$$

Em que TE é a eficiência de retenção de sedimentos (%), ω_s é a velocidade de deposição da partícula (m/s), ω_c é a velocidade crítica de deposição (m/s), u_* é velocidade cisalhante ($u_* = \sqrt{ghS}$), T_{ECamp} (%) considera igual a 100% se ($\omega_s > \omega_c$), caso ($\omega_s < \omega_c$), T_{ECamp} é a razão entre (ω_s/ω_c). O fator adimensional de turbulência α indica condições de repouso quando próximo a 1,0 e condições de turbulência igual a 0,01.

Segundo Gu *et al.*, (2017), a eficiência de retenção em um reservatório está diretamente relacionada:

- Às características do sedimento, como massa específica, tamanho e velocidade queda;

- Às características do reservatório, como forma, relação comprimento-largura, a profundidade e a localização das entradas e saídas, interferindo no tempo de residência e condições de escoamento;
- Aos escoamentos turbulentos, que dificultam a deposição e promovem a ressuspensão;
- À carga de sedimentos, que reduz a eficiência de retenção, sendo que cargas mais altas geralmente resultam em maior eficiência de remoção;
- À vegetação, que pode reduzir a velocidade da água e aumenta a retenção de sedimentos, aumentando a eficiência de retenção;
- Ao vento, que pode gerar turbulência e ondas, dificultando a deposição e até mesmo ressuspensão de sedimentos, reduzindo a eficiência de retenção, e;
- À estratificação térmica, que pode influenciar a movimentação dos sedimentos na coluna de água, alterando a viscosidade e assim, a velocidade de queda.

Além da quantificação da retenção de sedimentos, é importante compreender a forma como os sedimentos são transportados dentro de um reservatório. Nesse sentido, um processo de grande relevância é chamado de correntes de densidade, relacionado às diferenças de densidade entre a mistura e a água. Segundo Simpson (1997), o movimento das correntes de densidade se deve à diferença de densidade entre o fluido local e o fluido circundante. As partículas suspensas na corrente aumentam sua densidade em relação ao fluido circundante, permitindo que a suspensão turbulenta se mova em qualquer inclinação.

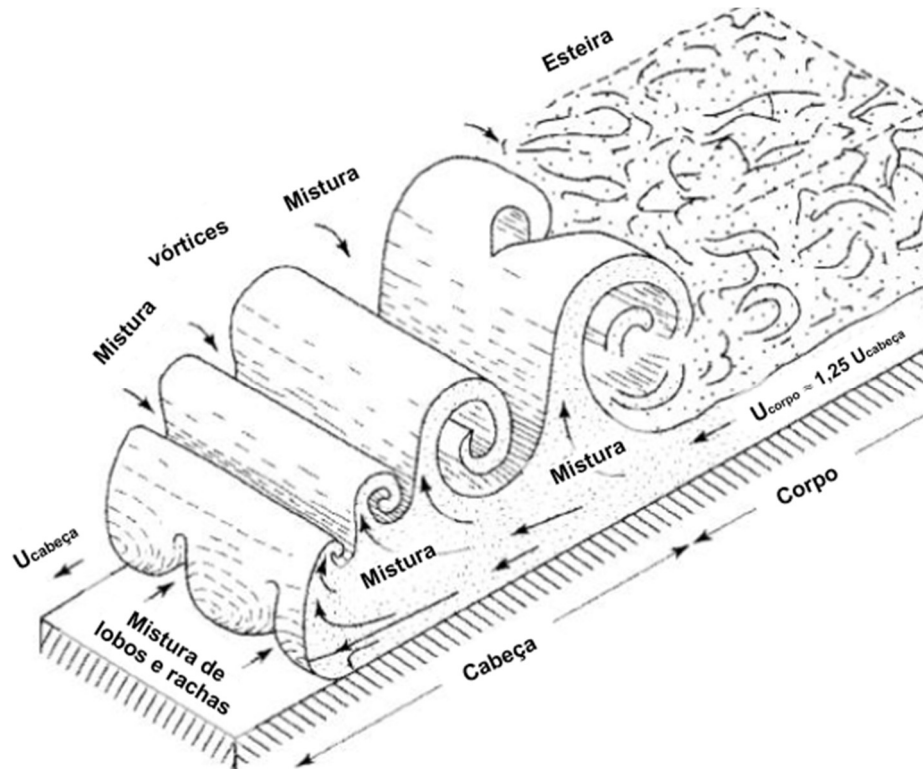
Em reservatórios, este fenômeno pode ocorrer através de uma descarga pontual ou por cargas sólidas contínuas. Uma descarga pontual sucede por deslizamento e desintegração de um volume finito de sedimentos, enquanto fluxos contínuos apresentam descarga constante de sedimentos por um longo período, provavelmente devido a inundações fluviais, deslizamentos constantes ou ambos (ALEXANDER *et al.*, 2002 apud SCAPIN, 2022).

As correntes de densidade são fenômenos extremamente complexos: fluxos não uniformes, não permanentes e não lineares. Além disso, a diferença de densidade

entre os fluidos, que governa o escoamento, é não conservativa, variando à medida que o sedimento é depositado e erodido (ALLEN, 1985 apud PUHL, 2012). Essa interação ocorre nas oscilações na velocidade de propagação da corrente, geradas por acelerações e desacelerações ligadas à formação e ao desprendimento de vórtices transversais. Segundo Puhl (2012), quando ocorre deposição de sedimentos, as diferenças entre as densidades de correntes se reduzem, desacelerando o fluxo e tendendo a depositar cada vez mais. Quando ocorre erosão do leito e mais material é incorporado na corrente, aumenta-se a energia interna do fluxo, aumentando a capacidade de transporte e alcançando maiores distâncias.

Simpson (1997) descreveu as características geométricas das correntes de densidade divididas em cabeça, corpo, e, em alguns casos, cauda e nariz. A diluição e ou mistura com o fluido ambiente ocorre na diluição cabeça da corrente, que apresenta maior velocidade. Segundo Scapin (2022), a resistência junto ao fundo, devido à condição de não deslizamento, pode criar um ponto à frente e acima da superfície inferior, chamado nariz da corrente. Nessa região, o fluxo ultrapassa o fluido ambiente, ocorrendo entrada deste na corrente e resultando em uma zona de instabilidade gravitacional tridimensional, chamada complexo de lobos e rachas (MIDDLETON, 1993). Outro ponto de mistura é identificado na camada superior do corpo com o fluido ambiente que forma uma esteira de vórtices chamado de Kelvin-Helmholtz (ELLISON; TURNER, 1959 apud SCAPIN, 2022). O *corpo* é uma camada mais densa e com velocidade permanente.

Figura 1 - Representação esquemática dos parâmetros de uma corrente de densidade.



Fonte: (adaptado BOGGS, 2006 apud SCAPIN, 2022).

O critério utilizado para quantificar a estabilidade dos processos de mistura é dado pelo número de Richardson (Ri), que expressa a razão entre as forças de empuxo e inércia, indicando que $Ri > 1$ é considerada uma corrente subcrítica e $Ri < 1$ é uma corrente supercrítica.

$$Ri = \frac{g C_v h}{U^2} \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) \quad (9)$$

Sendo, g a aceleração da gravidade (m/s^2), C_v a concentração volumétrica de sólidos, ρ_s a massa específica de sólidos (g/cm^3) e ρ_w a massa específica da água (g/cm^3), h a profundidade do escoamento (m) e U é a velocidade média no trecho de propagação (m/s). No caso de correntes supercríticas, os altos níveis de cisalhamento na região superior concentram os maiores níveis de energia turbulenta e as correntes subcríticas, a maior energia turbulenta se encontra na base do corpo (PUHL, 2012). No entanto, estudos apontaram que mesmo em correntes subcríticas a região superior do corpo apresenta maiores níveis de cisalhamento turbulento. Este comportamento

foi associado ao a entrada de um volume finito que ocasiona altos níveis de cisalhamento na camada superior do corpo (KNELLER; BUCKEE, 2000 apud PUHL, 2012).

Além disso, outro coeficiente importante é o coeficiente de carreamento (e_w), que relaciona a velocidade de escoamento U (m/s) com a velocidade de carreamento w_e (m/s), indicado pela Eq. (10).

$$e_w = \frac{w_e}{U} \quad (10)$$

Segundo função ajustada por Parker *et al.* (1987 apud PUHL, 2012), o coeficiente de carreamento é dado em função do número de Richardson (Eq. (11)).

$$e_w = \frac{0,00153}{0,0204 + R_i} \quad (11)$$

O processo de transporte e deposição de sedimentos é bastante complexo e afetado por questões físicas da geometria do reservatório, condições hidráulicas do escoamento e pelas características do sedimento. Um parâmetro de grande relevância é a velocidade de queda do sedimento (ω_s).

3.3 Velocidade de Queda

3.3.1 Velocidade de queda da partícula

O movimento de partículas sólidas em velocidade terminal ocorre em um fluido em repouso onde as forças atuantes na partícula são a força peso e força de arrasto. Após atingirem o equilíbrio de forças, a partícula se movimenta com velocidade terminal (ω_s), princípio primeiramente estabelecido por Newton (Equação (12)). Portanto, a força de arrasto é proporcional ao coeficiente de arrasto C_d , uma constante a ser estabelecida experimentalmente, que é uma função da pressão dinâmica (DEY *et al.*, 2019).

$$F_D = C_d \frac{1}{2} \rho_w \bar{U} A \quad (12)$$

Dessa forma, a força de arrasto F_D (N) depende da velocidade média $\bar{U}$ (m/s), da área projetada da partícula A (m²) e da massa específica do fluido ρ_w (g/cm³). A correlação é esperada apenas quando o valor de Reynolds R_e (Equação (13)) da partícula é superior a 10^3 (DEY et al., 2019).

$$R_e = \frac{Ud}{\nu} \quad (13)$$

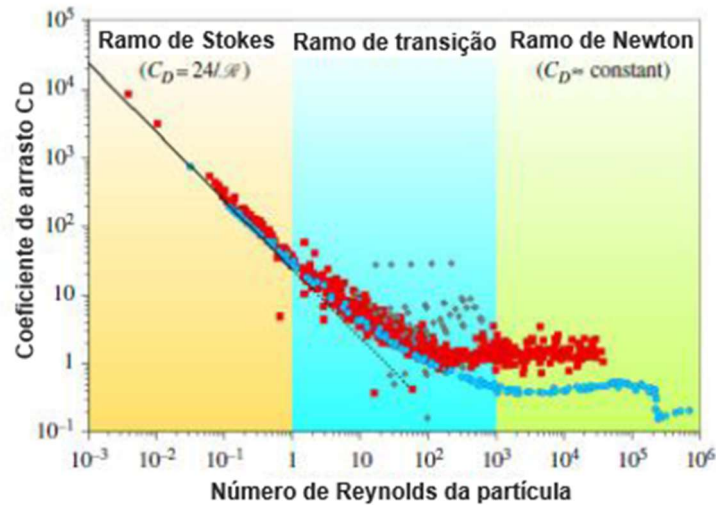
Stokes (1851) fez notáveis contribuições na dinâmica de fluidos definindo a força de arrasto, também conhecida como a lei de Stokes (Equação (14)). A equação relaciona o coeficiente de arrasto C_d , baseando-se no número de Reynolds (R_e) da partícula e em equações de movimento de Navier-Stokes, negligenciando os termos de inércia da equação e considerando a condição de equilíbrio entre a força peso e a força de arrasto da partícula.

$$F_D = 3\pi\mu Ud \quad (14)$$

Em que, μ é a viscosidade dinâmica (10^3 Ns/m²), U é a velocidade do fluido (m/s) e d o diâmetro da partícula (m). A equação é válida somente para número de Reynolds menor que um (fluxo sub-laminar $R_e < 1,0$). Sendo ν a viscosidade cinemática do fluido. A análise foi desenvolvida para pequenas partículas esféricas, com diâmetro igual ou inferior a 1 mm.

Portanto, observa-se três grandes ramos na dinâmica da partícula em um fluido: estocástico ($R_e > 1,0$), de transição ($1,0 < R_e < 10^3$) e newtoniano ($R_e > 10^3$). Embora as leis de Newton e Stokes funcionem bem dentro de seus respectivos intervalos, conforme apresentado na Figura 2, ainda há uma base teórica insuficiente para preencher a aparente lacuna entre esses ramos (DEY et al., 2019).

Figura 2 – Coeficiente de arrasto (C_d) versus Reynolds da Partícula, nos ramos de Stokes, Newtoniano e de transição.



Fonte: (adaptado DEY *et al.*, 2019).

Para partículas naturais e de formatos irregulares, não há solução analítica para definição do escoamento ao redor destas bem como previsão da velocidade de queda (DIETRICH, 1982). Dessa forma, a definição da velocidade de queda de partículas não esféricas foi alvo de busca de equações de regressões de dados empíricos, as quais estabelecem relações com os fatores identificados que alteram a velocidade de queda da partícula, como densidade da partícula, tamanho, forma, textura (ZANKE, 1977 apud ZHIYAO *et al.* 2008; JIMÉNEZ; MADSEN, 2004; CAMENEN, 2007; CHENG, 1997; JULIEN, 2010), assim como densidade, viscosidade, temperatura, salinidade e pH da água (CHIEN; WAN, 1999; HUANG, 1981; WAN *et al.*, 2015).

A influência da viscosidade do fluido é inversamente proporcional à força de arrasto, de forma que a velocidade de queda de uma partícula em fluido viscoso é consideravelmente inferior em comparação a um fluido menos viscoso. Sendo a viscosidade influenciada pela temperatura do fluido.

Outro fator de grande relevância é a relação de densidade das partículas, estando diretamente relacionado à composição mineralógica do sedimento. Por exemplo, (Julien, (2010) utiliza o parâmetro de densidade específica ($G = \rho_s / \rho_{\text{água } 4^\circ\text{C}}$) para comparar diferentes sedimentos, como Quartzo (2,66), Hematita (5,3), Óxido Férrico (4,3), Alumina (3,6 - 3,9) e Húmus (<1,5).

Referente ao tamanho da partícula, usualmente é considerado o diâmetro característico (d_s) que pode ser determinado a partir do peneiramento da amostra. Sendo o D_{50} o valor definido do diâmetro de partícula a 50% da distribuição cumulativa normal (MEHTA, 2014 apud WAN *et al.*, 2015), que é uma forma estatística comumente utilizada e significativa de quantificar o tamanho de partícula de sedimentos não uniformes. Outro conceito bastante utilizado é o diâmetro da esfera de mesmo volume da partícula, chamado de diâmetro nominal d_n (WADELL, 1932 apud JIMÉNEZ; MADSEN, 2004), que é considerado como $d_n = 0,9 d_s$, ou também o diâmetro adimensional (d_*) da partícula (SOULSBY, 1997), conforme Equação (15), em que d_* o diâmetro da partícula adimensional, d_s o diâmetro da partícula (m), ρ_w massa específica do fluido (g/cm³), ρ_s massa específica da partícula (g/cm³), ν a viscosidade cinemática (m²/s) e g a aceleração da gravidade (m/s²).

$$d_* = d_s \left(\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \frac{g}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad (15)$$

No caso de partículas mais grossas, de elevado número de Reynolds, os padrões de escoamento em volta da partícula se tornam complexos devido à separação da camada limite associada a vórtices, que inicialmente tem padrão periódico e depois aleatório (GÖGÜS; IPEKÇI; KÖKPINAR, 2001). Conforme exemplificado por Campello, (2017) a partir do trabalho de Göğüs *et al.*, (2001), à medida que o número de Reynolds aumenta, a separação da camada limite impactando a distribuição de cisalhamento e pressão na superfície da partícula.

Outra razão da complexidade de se obter padrões de escoamento ao redor de partículas mais grossas é a formação de vórtices, gerando flutuações na pressão, oscilações de impulso transversal, torque sobre a partícula e movimentos de rotação que podem ocasionar uma força de sustentação perpendicular ao seu deslocamento (MEHTA *et al.*, 1980; NIELSEN, 1984 apud CAMPELLO, 2017).

Nota-se, portanto, que devido à complexidade dos fatores que interferem no movimento da partícula em um fluido, diversos autores estudaram diferentes

partículas para desenvolver equações que conseguissem abranger maior quantidade de sedimentos e incorporassem os fenômenos citados. A Tabela 1 apresenta algumas equações desenvolvidas, usualmente aplicadas nas modelagens numéricas hidrodinâmicas acopladas com transporte de sedimentos (HYDRONIA, 2021; USACE, 2022). Em que ω_s é a velocidade de queda da partícula (m/s), d_s o diâmetro da partícula (m), ρ_w massa específica do fluido (g/cm³), ρ_s massa específica da partícula (g/cm³), ν a viscosidade cinemática (m²/s), g a aceleração da gravidade (m/s²) e d_* o diâmetro da partícula adimensional.

Tabela 1 - Equação velocidade de queda da partícula obtida por diferentes autores.

Autor (ano)	Equação velocidade de queda – água em repouso
STOKES, (1851)	$\omega_s = \frac{1}{18} \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \frac{g d_s^2}{\nu}$
RUBEY (1933)	$\omega_s = F \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) g d_s} ; \text{ Se } d_s > 1 \text{ mm}, F = 0,79,$ caso contrário $F = \left(\frac{2}{3} + \frac{36 \nu^2}{g d_s^3 \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)}\right)^{0,5} - \left(\frac{36 \nu^2}{g d_s^3 \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)}\right)^{0,5}$
ZHANG (1961) ²	$\omega_s = \sqrt{\left(13,95 \frac{\nu}{d_s}\right)^2 + 1,09 \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) g d_s} - 13,95 \frac{\nu}{d_s}$
ZANKE (1977) ²	$\omega_s = 10 \frac{\nu}{d_s} \left[\left(1 + 0,01 \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \frac{g d_s^3}{\nu^2} \right)^{0,5} - 1 \right]$
VAN RIJN (1984) ³	$\omega_c = \begin{cases} \left(\frac{1}{18} \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \frac{g d_s^2}{\nu} \right) & \text{para } 0,065 \text{ mm} < d_s \leq 0,1 \text{ mm} \\ \frac{10 \nu}{d_s} \left(\sqrt{1 + 0,01 \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \frac{g d_s^3}{\nu^2}} - 1 \right) & \text{para } 0,1 \text{ mm} < d_s \leq 1,0 \text{ mm} \\ 1,1 \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g d_s} & \text{para } d_s \geq 1 \text{ mm} \end{cases}$
RAUDKIVI e WITTE (1990) ²	$\omega_s = \left(\frac{(2/3) \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g d_s^2}{\nu} - 32 \right) \frac{\nu}{1,2 d_s} \text{ para } d_s > 1 \text{ mm}$
JULIEN (2010) ²	$\omega_s = \left(\frac{(2/3) \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g d_s^2}{\nu} - 24 \right) \frac{\nu}{1,5 d_s}$
CHENG (1997) ²	$\omega_s = \frac{\nu}{d_s} \left(\sqrt{25 + 1,2 d_*^2} - 5 \right)^{1,5}$
SOULSBY (1997) ¹	$\omega_s = \frac{\nu}{d_s} \left[\left(10,36^2 + 1,049 d_*^3 \right)^{0,5} - 10,36 \right], \text{ onde } d_* = d_s \left(\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \frac{g}{\nu^2} \right)^{1/3}$

¹ inserido no software HEC-RAS ² inserido no software RiverFlow; ³ inserido no software HEC-RAS e RiverFlow.

A equação Rubey, (1933) tende a subestimar a velocidade de queda para sedimentos grossos em comparação aos sedimentos mais finos (USACE, 2020).

Os estudos de Zhang (1961), Zanke (1977), Soulsby (1997), Julien (1995) e Van Rijn (1995) propõem equações de velocidade de queda para sedimentos não coesivos em diferentes faixas de diâmetros da partícula. As diferenças estão nos coeficientes obtidos para as calibrações empíricas dos dados utilizados. Cheng (1997) utilizou análise de partículas naturais e fragmentos de conchas com diâmetros variando entre 0,001 mm e 4,5 mm, temperatura da água entre 8,2°C e 18,5°C.

A forma da partícula também afeta a sua velocidade de queda devido à resistência que ela oferece ao movimento. Conforme descrito por Dey *et al.* (2019), uma partícula irregular apresenta uma área de superfície maior em comparação com uma partícula esférica de mesmo diâmetro, o que provoca um deslocamento do fluido ao seu redor, resultando em uma maior resistência de atrito e pressão de arrasto. Assim, a velocidade de queda é reduzida e, adicionalmente, a irregularidade da superfície pode induzir instabilidade à partícula, levando-a à rotação e vibração, o que eventualmente diminui a velocidade de queda.

O fator de forma (S_F) mais simples, comumente usado e fisicamente significativo, corresponde ao fator de forma Corey, (1949), representado pela Equação (3.7), na qual os termos l_a , l_b e l_c representam as dimensões dos eixos mais longos, intermediários e curtos da partícula, respectivamente.

$$S_F = \frac{l_c}{\sqrt{l_a l_b}} \quad (16)$$

Este fator varia de 0 a 1 e é uma relação entre a área transversal de uma esfera e a área máxima da seção transversal de uma partícula com forma de um elipsoide (CAMENEN, 2007; CHENG, 1997).

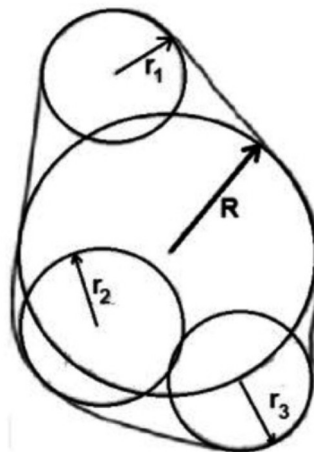
Segundo Dey (2014), partículas desgastadas naturalmente têm fator de forma próximo a ~0,7. No caso da arredondamento da partícula (P), Wadell (1933 apud POWERS,

1953) estabeleceu a relação entre raio do diâmetro de um círculo da área de projeção da partícula com os diâmetros de círculos menos circunscritos na área de projeção, conforme equação (17).

$$P = 6 \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{Rn} \quad (17)$$

Na qual, o termo r_i indica os raios internos das circunferências inscritas na partícula, R é o raio da maior circunferência e n é o número de circunferências inscritas na partícula, representam as dimensões dos eixos mais longos, intermediários e curtos da partícula. A exemplificação de estimativa é representada na Figura 3.

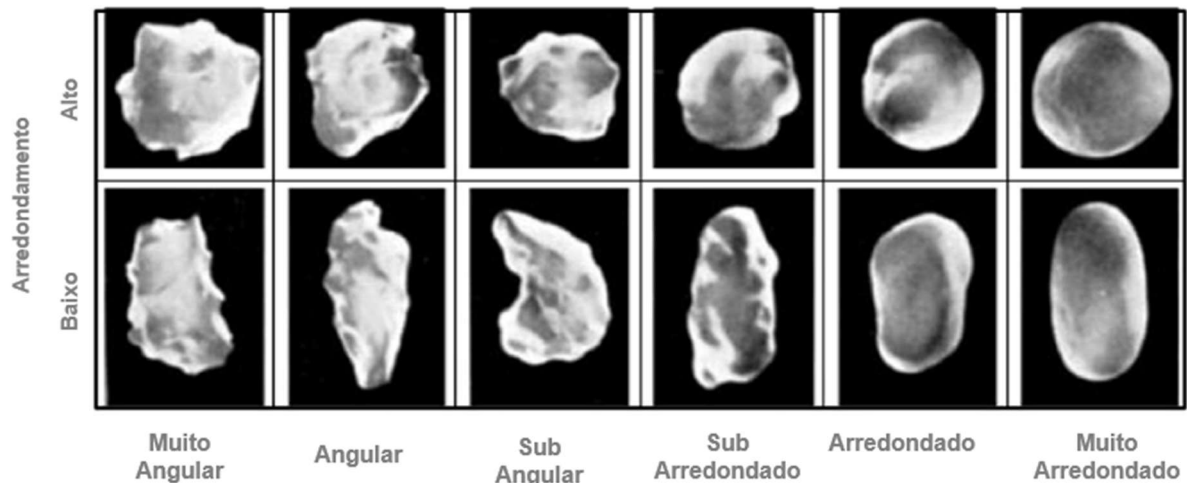
Figura 3 - Desenho esquemático de estimativa do arredondamento da partícula para imagens bidimensionais.



Fonte:(COMINI DE ANDRADE; ZEGARRA, 2020).

A classificação da esfericidade da partícula foi definida por Powers (1953), conforme Figura 4. O intervalo para o coeficiente que define a esfericidade da partícula é apresentado na Tabela 2.

Figura 4 - Classificação da Redondeza de uma partícula.



Fonte: (adaptado de FOLK, 1955).

Tabela 2 - Arredondamento de uma partícula.

Classe de arredondamento	Esfericidade (POWERS, 1953)	Arredondamento (P) (FOLK, 1955)
Muito angular	0,12 a 0,17	0,0 a 1,0
Angular	0,17 a 0,25	1,0 a 2,0
Sub-angular	0,25 a 0,35	2,0 a 3,0
Sub-arredondado	0,35 a 0,49	3,0 a 4,0
Arredondado	0,49 a 0,70	4,0 a 5,0
Muito arredondado	0,70 a 1,00	5,0 a 6,0

Fonte: (adaptado de USACE, 2022).

Dessa forma, as equações de velocidade de queda de Dietrich (1982), Wu e Wang (2006) e Camenen (2007) incorporaram os índices de S_F e P , conforme apresentado na Tabela 3. Em que ω_s é a velocidade de queda da partícula (m/s), d_s o diâmetro da partícula (m), ρ_w massa específica do fluido (g/cm³), ρ_s massa específica da partícula (g/cm³), ν a viscosidade cinemática (m²/s), g a aceleração da gravidade (m/s²) e d_* o diâmetro da partícula adimensional.

Tabela 3 - Equação velocidade de queda da partícula que incorporam fator de forma e redondeza da partícula.

Autor (ano)	Equação velocidade de queda – água em repouso
	$\frac{\omega_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) g v} = R_3 10^{R_1 + R_2}$
DIETRICH (1982) ¹	$R_1 = 3,76715 + 1,9244 \log_{10} d_* - 0,09815 (\log_{10} d_*)^2 - 0,00575 (\log_{10} d_*)^3 + 0,000056 (\log_{10} d_*)^4$ $R_1 = \left[\log_{10} \left(1 + \frac{S_F}{0,85} \right) \right] - (1 - S_F)^{2,3} \tanh(\log_{10} d_* - 4,6) + 0,3(0,5 - S_F)(1 - S_F)^2 (\log_{10} d_* - 4,6)$ $R_3 = \left\{ 0,65 - \left[\frac{S_F}{2,83} \tanh(\log_{10} d_* - 4,6) \right] \right\}^{1 + (3,5 - P)/2,5}$
JIMÉNEZ; MADSEN (2003) ³	$\omega_s = (C_1 + C_2 S_*) \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) g d_s} \quad \text{sendo}$ $C_1 = 1,06 \tanh(0,064 S_* \exp(-7,5/S_*^2)) \text{ e } C_2 = 0,22 \tanh(2,34 S_*^{-1,18} \exp(-0,0064 S_*^2))$ $S_* = \frac{d_s}{4v} \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) g d_s}$
WU-WANG (2006) ²	$\omega_s = \frac{M}{N} \frac{v}{d_s} \left(\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{4N}{3M^2} d_*^3 \right)^{1/n}} - 0,5 \right)^n$ Em que $M = 53,5 e^{-0,65 S_F}$, $N = 5,65 e^{-2,5 S_F}$, $n = 0,7 + 0,9 S_F$
CAMENEN (2009)	$\omega_s = \frac{v}{d_s} \left[\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{A}{B} \right)^{2/m} + \left(\frac{4}{3B} d_*^3 \right)^{1/m}} - \frac{1}{2} \left(\frac{A}{B} \right)^{1/n} \right]^m$ $A = 24 + 100 \left[1 - \sin \left(\frac{\pi}{2} S_F \right) \right]^{(2,1 + 0,006P)}$ $B = 0,39 + 0,22(6 - P) + 20 \left[1 - \sin \left(\frac{\pi}{2} S_F \right) \right]^{(1,75 + 0,35 P)}$ $A = (1,2 + 0,12P) \sin^{0,47} \left(\frac{\pi}{2} S_F \right)$

¹ inserido no *software* HEC-RAS ² inserido no *software* RiverFlow; ³ inserido no *software* HEC-RAS e RiverFlow.

Para desenvolver uma equação empírica capaz de explicar os efeitos do tamanho, densidade, forma e redondeza da partícula na velocidade de queda do sedimento natural, Dietrich (1982) utilizou dados de 14 estudos experimentais anteriores, com análise de diversas partículas não coesivas, esféricas e naturais.

Jimenez e Madsen (2003) apresentaram uma equação mais simples, derivada do trabalho anterior de Dietrich, (1982) para partículas naturais, com tamanhos de grãos

variando entre 0,063 mm e 1,00 mm, desde que conhecido o fator de forma e o arredondamento do sedimento. Os valores de C1 e C2 apresentados na Tabela 3 foram obtidos para sedimentos com fator de forma igual a 0,7.

Já Wu e Wang (2006) usaram uma gama mais ampla de dados, com fator de forma da partícula variando de 0,3 a 1,0 e um grande intervalo de Reynolds da partícula. Pode ser considerado uma equação geral de Rubey (1933), Zhang (1961) e Cheng (1997), com os diferentes valores de M, N e n.

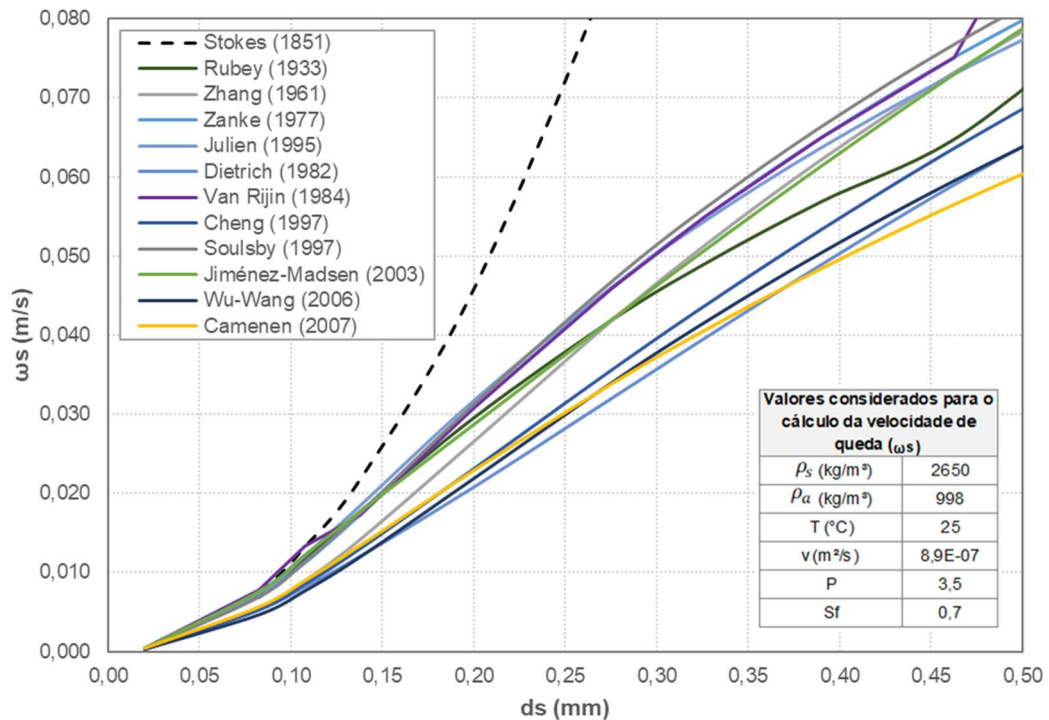
Camenen (2007) estabeleceu uma nova equação semi-empírica simples e robusta, que considera a forma e a redondez da partícula e baseia-se em dois comportamentos assintóticos do coeficiente de arrasto para baixo e elevado número de Reynolds da partícula usando um expoente “m” para conectar esses dois comportamentos assintóticos. Segundo Camenen, (2007), a equação foi calibrada utilizando os resultados do estudo de Dietrich, (1982) e um grande conjunto de dados experimentais de 10 autores com informações do tamanho, forma, arredondamento e densidade das partículas de sedimento. Segundo Camenen, (2007), a equação de Dietrich, (1982) apresentou melhores resultados para esferas e partículas arredondadas, embora não tenha produzido bons resultados para a areia.

Ressalta-se que o estudo elaborado por Shankar *et al.*, (2021) indicou que a equação de Wu e Wang, (2006) obteve a melhor performance, tanto para as partículas consideradas areias naturais, de $G = 2,65$ e $S_f = 0,7$, quanto para partículas de densidade específica entre 3,97 a 5,07 e variações de fator de forma entre 0,049 a 0,881. Já Camenen, (2007) e Jiménez e Madsen, (2004) obtiveram melhores resultados para os sedimentos naturais do que para o grupo com G e S_f variáveis, o que não era esperado já que as equações propostas incorporam a variação da forma e arredondamento da partícula. Provavelmente deve estar relacionado a diferenças de dados utilizados pelos autores.

A partir das equações da Tabela 1 e Tabela 3, na Figura 5 é possível comparar os resultados dos valores de velocidade de queda da partícula para diversas equações considerando valores de sedimentos usualmente indicados para areias naturais, tais

como, massa específica de 2,650 g/cm³, fator de forma igual a 0,7, arredondamento da partícula igual a 3,5 (sub-arredondada) e massa específica e viscosidade cinemática da água para temperatura de 25 °C.

Figura 5 - Comparação entre equações de velocidade de queda por diversos autores.



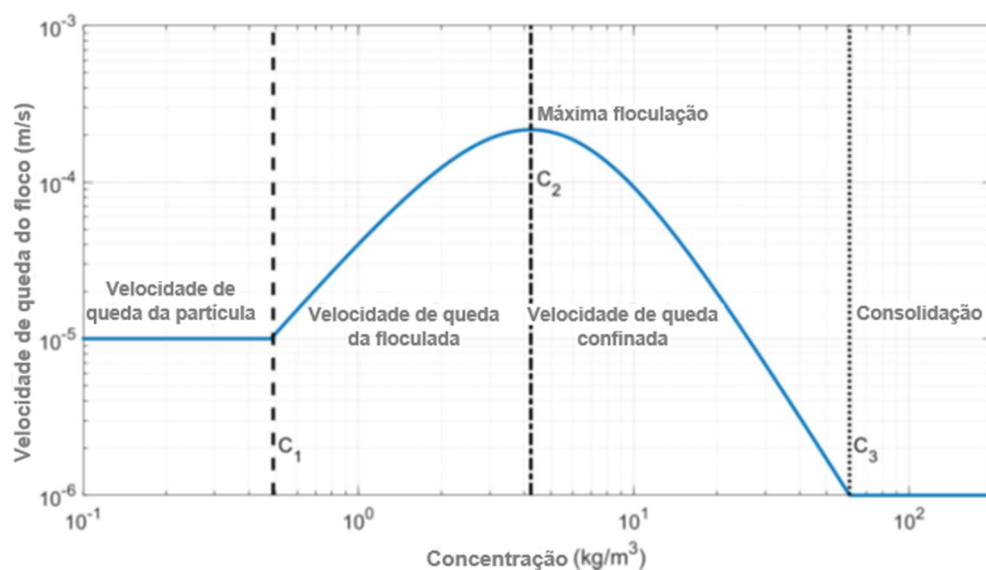
3.3.2 Velocidade de queda para diferentes concentrações

No caso de sedimentos finos, Rubey (1933) observou que o Reynolds da partícula se enquadra no ramo de Stokes, possibilitando estimar a velocidade de queda da partícula a partir da equação de Stokes, (1851). No entanto, a velocidade de queda dos sedimentos finos é consideravelmente impactada pela interação com outras partículas no meio fluido. Algumas propriedades físicas e químicas das partículas são relevantes para compreensão de interações que afetam diretamente a velocidade de queda, como a formação de flocos. Dentre essas interações têm-se os efeitos como agregação-repulsão através de forças de *Van der Waals*, forças eletrostáticas e magnetismo remanescente e movimento browniano (FRACARO, 2022).

A floculação consiste na propriedade de sedimentos de se agregar e sedimentar como uma massa floculada (JULIEN, 2010), sendo alterada com a alta concentração de sedimentos, alto teor de sal e elevada temperatura do fluido. Nos casos de processos de separação sólido-líquido, são adicionados polímeros de alto peso molecular para acelerar o processo de formação de flocos e, conseqüentemente, a sedimentação das partículas. Estes polímeros se ligam aos flocos, preenchendo os espaços entre eles e criando um agregado maior e mais denso. O processo de floculação com polímeros envolve a dissolução do polímero na solução, a adsorção nas partículas e a formação de pontes entre elas. (FRACARO, 2022). Um ponto relevante é que os flocos podem se quebrar em ambientes turbulentos.

Foram observadas três etapas de variação da velocidade de queda em relação à concentração de sólidos no fluido: fase acelerada, fase de máxima floculação e fase confinada desacelerada (*hindred*), conforme Figura 6.

Figura 6 - Relação entre concentração de sólidos em suspensão e velocidade de queda.



Fonte:(HWANG, 1989).

A primeira etapa indica que durante o processo de sedimentação uma pequena variação na concentração de sólidos pode afetar uma grande mudança na velocidade de queda e na formação de flocos (MANNING *et al.*, 2010; MIKKELSEN *et al.*, 2007; WINTERWERP; VAN KESTEREN, 2006).

Na segunda etapa, os flocos atingem um valor máximo de tamanho e densidade, não havendo mais influência da concentração de sólidos no processo de floculação. Consequentemente, a velocidade de queda atinge um valor máximo. No entanto, o papel da formação de flocos ainda pode ser afetado por outros fatores, como salinidade ou temperatura (WAN *et al.*, 2015). E embora seja possível encontrar uma ampla extensão desses efeitos, a concentração crítica para a máxima floculação varia entre a faixa de 1 g/L a 30 g/L (AL ANI *et al.*, 1991; LI; MEHTA, 1998; WU; WANG, 2004 apud WAN *et al.*, 2015).

Na terceira etapa, a depender da concentração de sedimentos, a velocidade de queda se reduz, chamada de condição confinada (*Hindered Settling*), quando a interferência de partículas vizinhas causa maior resistência do fluido. Quando ocorre floculação, a velocidade é inibida de forma distinta devido ao aumento do tamanho dos flocos e à diminuição da densidade (WAN *et al.*, 2015).

A Tabela 4 apresenta as equações de velocidade de queda variando com a concentração de sólidos. Em que ω_s é a velocidade de queda da partícula (m/s), ω_c é a velocidade de queda relativa a uma concentração (m/s) d_s o diâmetro da partícula (m), ρ_w massa específica do fluido (g/cm³), ρ_s massa específica da partícula (g/cm³), ν a viscosidade cinemática (m²/s), g a aceleração da gravidade (m/s²), d_* o diâmetro da partícula adimensional, C a concentração mássica (g/L) e C_v a concentração volumétrica (%).

Tabela 4 - Equações de velocidade de queda para diferentes concentrações.

Autor (ano)	Equação velocidade de queda relacionado à concentração de sólidos
HWANG ¹ , (1989)	$\omega_c = \begin{cases} \omega_s & \text{para } C \leq C_1 \text{ (entre 0,1 a 0,3 g/L)} \\ \alpha \frac{C^n}{(C^2 + b^2)^m} & \text{para } C_1 < C \leq C_3 \\ \omega_{s3} & \text{para } C \geq C_3 \text{ (superior a 75 g/L);} \end{cases},$ C_1 sedimentação livre; C_2 floculação (próximo a 4 g/L); C_3 confinada (superior a 75 g/L); α (0,01 a 0,23 m/s); b (1,0 a 2,8); m (1,0 a 2,8); n (0,4 a 2,8)

Autor (ano)	Equação velocidade de queda relacionado à concentração de sólidos – faixa confinada
RICHARDSON E ZAKI (1954)	$\omega_c = \omega_s(1 - Cv)^m$ $m(R_p < 0,2) = 4,65 \quad ; \quad m(0,2 < R_p < 1) = 4,4R_p^{-0,03} \quad ;$ $m(1 < R_p < 500) = 4,4R_p^{-0,03} \quad ; \quad m(R_p > 500) = 2,4$
OLIVER (1961)	$\omega_c = \omega_s(1 - 2,15Cv)(1 - 0,75Cv^{0,33})$
Autor (ano)	Equação velocidade de queda relacionado à concentração de sólidos – faixa confinada
SHA ² (1965)	$\omega'_c = \left(1 - \frac{Cv}{2\sqrt{d_{50}}}\right)^m \omega_s$
SOULSBY (1997) ¹	$\omega_c = \frac{A_1}{A_2} \frac{v}{d_n} \left\{ \sqrt{\left[\frac{1}{4} + \left(\frac{4A_2}{3A_1^2} d_*^3 \right)^{\frac{1}{A_3}} \right]} - \frac{1}{2} \right\}^{A_3}$ onde, $A_1 = 26(1 - C)^{-4,7}$; $A_2 = 1,3(1 - C)^{-4,7}$ e $A_3 = 1$ $\omega'_s = (1 - C_v)^n \omega_s$, sendo n (3,75 a 4,45) para (c > 3 g/L)¹
CHENG (1997)	$\omega_c = \omega_s(1 - Cv)^m = 2\omega_s \left(\frac{1 - Cv}{2 - 3Cv} \right) \left\{ \frac{\sqrt{\frac{2}{R_p^3} \left(10 + R_p^{\frac{2}{3}} \right) \left[\left(\frac{1}{4} \right) \left((1 - Cv)(2 + 3Cv)^2 / (1 + \Delta Cv) \right) \right]^{\frac{2}{3}} + 25 - 5}}}{\sqrt{\left(25 + R_p^{\frac{4}{3}} + 10R_p^{\frac{2}{3}} \right) - 5}} \right\}$ onde $\Delta = \frac{(\rho_p - \rho_w)}{\rho_w}$

¹ inserido no *software* HEC-RAS ² inserido no *software* RiverFlow.

No caso de concentrações superiores a 20%, segundo (O'Brien *et al.*, 1985), o fluido é considerado hiperconcentrado. Os fluidos nessa condição são considerados não-newtonianos, ou seja, a correlação entre tensão cisalhante e deformação não é linear. Nesse caso, ocorre um efeito importante de variação da viscosidade e densidade da mistura. Conforme descrito por Eltilib *et al.*, (2011), o aumento da densidade do fluido também resulta em uma redução da velocidade de queda de partículas, especialmente em viscosidades de fluido altas e partículas pequenas.

3.4 Rejeito de minério de ferro

3.4.1 Beneficiamento do minério de ferro

O Brasil é um dos principais produtores de minério de ferro no cenário global de mineração. Os rejeitos do beneficiamento de minério de ferro podem variar conforme a distribuição granulométrica, heterogeneidade geológica natural dos bens minerais, o grau de cominuição e ainda através dos métodos de beneficiamento do minério.

Somente alguns minerais apresentam ferro em grandes proporções, destacando-se como os principais: a hematita (Fe_2O_3), a magnetita (Fe_3O_4), a goethita (FeO/OH) e a siderita (FeCO_3) (JESUS, 2010 apud VIGLIONE, 2018). Os principais estados produtores de minerais/minérios de ferro são Pará e Minas Gerais, com reservas de hematita e itabirito. Sendo o itabirito uma rocha metamórfica, cujos principais componentes minerais são o quartzo e os óxidos de ferro.

Os processos de tratamento ou beneficiamento do minério de ferro consistem de diversas operações (DA LUZ; LINS, 2010), como:

- Cominuição (Britagem e Moagem);
- Peneiramento (Separação por Tamanhos);
- Classificação (Ciclonagem, Classificação em Espiral);
- Concentração (Gravítica, Magnética, Eletrostática, Flotação);
- Desaguamento (Espessamento e Filtragem);
- Secagem (Secador Rotativo, Spray Dryer, Secador de Leito Fluidizado), e;
- Disposição de Rejeito.

Conforme Da Luz *et al.*, (2010), os procedimentos de beneficiamento têm o objetivo de alterar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais ou a forma dos materiais. Além disso, podem alterar quimicamente o material decorrente de processos como a decomposição térmica simples, reações induzidas pelo calor, ou adição de produtos químicos para processos de coagulação e floculação.

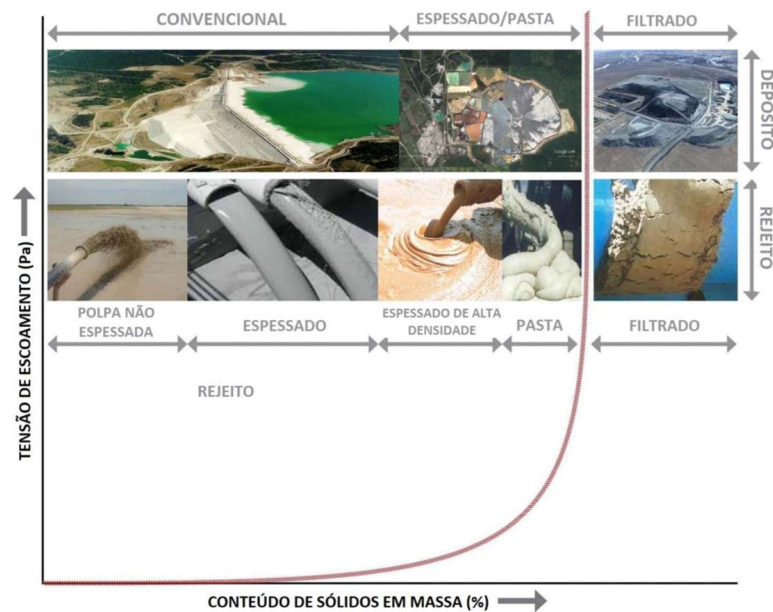
Dentre os diversos processos que possibilitam a separação de minerais, a separação magnética retira minerais de ferro e funciona tanto a seco quanto a úmido, tornando viável sua utilização em regiões com pouca disponibilidade hídrica (SAMPAIO; ADÃO; FRANÇA, 2010).

A separação eletrostática separa minerais de acordo com sua carga superficial, sendo influenciada por características como capacidade de adquirir cargas elétricas superficiais, granulometria, forma, geometria, densidade e condutividade elétrica (SAMPAIO; ADÃO; FRANÇA, 2010). Já a flotação utiliza substâncias para levar o particulado indesejado para a superfície, permitindo que elas sejam separadas com o auxílio de bolhas de ar. Após a concentração inicial, o material é submetido a um processo de desaguamento para remover o excesso de água presente na polpa.

Os rejeitos de minério de ferro podem vir de diferentes processos de beneficiamento como diretamente da flotação, deslamagem ou posterior a processos de espessamento e filtragem. Após o beneficiamento, os rejeitos são tradicionalmente depositados em forma de polpa em barragens de contenção. Essa metodologia exige elevado consumo de água, grandes áreas e apresenta significativo impacto ambiental, o que leva as empresas a enfrentarem maiores dificuldades para a obtenção de novos licenciamentos (ALVES, 2020). Os eventos de ruptura recentes e a proximidade das minas de áreas urbanas têm resultado em maior pressão da sociedade sobre as empresas com cobranças de novas e melhores alternativas para o processo de beneficiamento e disposição dos rejeitos de minério de ferro.

Os métodos alternativos de disposição de rejeito variam conforme o teor de sólidos, tensão de escoamento, natureza de beneficiamento, condições geológicas e topográficas locais, propriedades mecânicas dos materiais e potencial de impacto ambiental dos rejeitos (DUARTE, 2008 apud ALVES, 2020). A Figura 7 apresenta um resumo das técnicas de disposição de rejeito e as características dos rejeitos.

Figura 7 - Diferentes tipos de rejeitos, seus aspectos e tipos de depósito.



Fonte: (MEND, 2017).

Os métodos de empilhamento drenado (para rejeito arenoso), lama espessada, pasta, disposição subaérea e disposição de rejeitos filtrados (para rejeitos finos) são considerados alternativas para a disposição (ALVES, 2020). Sendo a Pilha de Rejeito Filtrado (*dry stacking*) uma técnica de deposição com grande crescimento nos últimos anos (DOS SANTOS *et al.*, 2022). Para deposição em Pilhas devem ser incluídos no processo os espessadores e filtros para atingirem a consistência e padrões necessários para a restituição final. Esta técnica também apresenta a vantagem de promover o aumento da recuperação de água do processo da planta de beneficiamento, reduzindo o consumo de água nova (GUIMARÃES *et al.*, 2011).

Durante o espessamento as partículas têm seu movimento modificado pelas forças da gravidade, empuxo e pela força de atrito entre líquido e partículas. São comumente adicionados floculantes ou coagulantes para aumentar a taxa de sedimentação favorecendo o processo de formação de agregados e reduzindo a superfície específica total das partículas (OLIVEIRA *et al.*, 2004). Após o espessamento, o rejeito passa por um meio filtrante, que é capaz de reter partículas sólidas e permitir a passagem do líquido (PORTES, 2013). A Tabela 5 apresenta a comparação entre consistências do rejeito, tecnologias de desaguamento, transporte e formas de disposição.

Tabela 5 - Comparação entre consistências do rejeito, tecnologias de desaguoamento, transporte e formas de disposição.

Consistência do rejeito	Tecnologia de desaguoamento	Características da tecnologia de desaguoamento	Transporte	Comparativo da forma de disposição
Polpa (tipicamente segregável - 30 a 58% de sólidos)	Espessador convencional	ação ineficiente do floculante grande área (diâmetros de até 150 m) obtém baixa densidade	por gravidade a partir de calhas ou tubulação de baixa pressão. Com ou sem bombas centrífugas	Recuperação ineficiente de água; Bombas centrífugas são suficientes; Necessidade de gestão extensiva da água; Necessidade de estrutura(s) de contenção (barragens); Escoamento e potencial de infiltração altos; Reabilitação difícil; CAPEX e OPEX baixos; alto custo de reabilitação.
Lama espessada (55 a 65% de sólidos)	Espessador <i>High rate</i>	adição de floculante menos área e obtém densidade similar se comparado ao convencional	bombas centrífugas ou diafragma	Recuperação de água melhorada; Bombas de deslocamento positivo e/ou diafragma; Gestão de ponto de lançamento (maior ângulo de praia);
pasta de baixa densidade (60 a 70% de sólidos)	Espessadores <i>Deep bed</i> ou <i>Deep cone</i>	menor área e maior altura obtém máxima densidade	bombas de pistão ou diafragma (alta pressão)	Gestão reduzida da água;
pasta de alta densidade (65 a 75% de sólidos)	Espessador <i>Deep cone</i> ou filtro		bombas de deslocamento positivo com tubulação de alta pressão	necessária alguma estrutura de contenção; Escoamento e potencial de infiltração médios; Reabilitação difícil; CAPEX e OPEX altos; alto custo de reabilitação.
Torta filtrante seca (> 80% de sólidos)	Filtragem a vácuo	Cria pressão negativa debaixo do meio filtrante	caminhão ou correia	Recuperação de água eficiente; Transporte por caminhão ou correia;
	filtragem sob pressão	uma pressão positiva é aplicada na polpa		Mínima gestão de água;
	filtragem centrífuga	utiliza força centrífuga para forçar a passagem do líquido		Requer contenção mínima (Pilhas) Perdas por infiltração insignificante;
	filtragem hiperbárica	combinação de vácuo e pressão		Possibilidade de reabilitação progressiva;
	filtragem capilar	ação capilares de meios cerâmicos porosos para efetuar o desagregamento		Massa de rejeitos estável; CAPEX e OPEX muito alto; baixo custo de reabilitação.

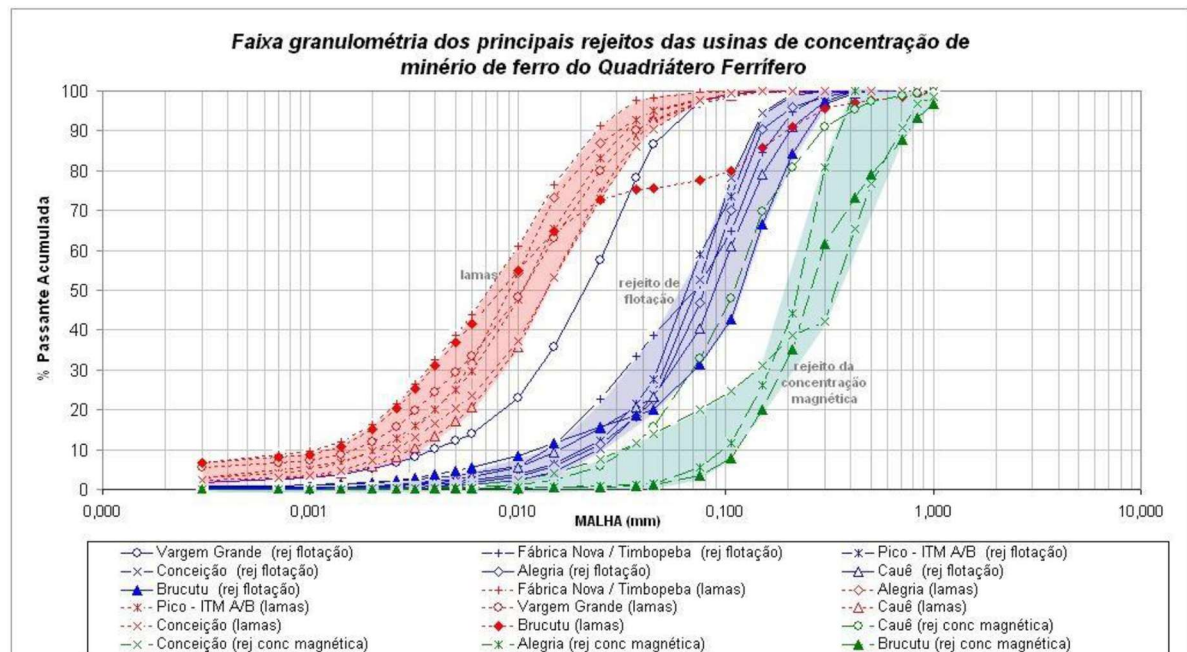
Fonte: (adaptado de ALVES, 2020).

Dada a elevada produção de rejeitos de minério de ferro no Brasil, estudos recentes têm intensificado a exploração de novas possibilidades para o reaproveitamento desses materiais provenientes da mineração. Diversos estudos avaliaram a viabilidade de transformar em coprodutos, o potencial na construção civil, a aplicação de rejeitos em pó na fabricação de argamassa de cimento Portland, o uso na blendagem de calcário para correção do solo e ainda como potencial filtro em barragens, substituindo areia natural. (ARISTIMUNHO; BERTONICINI, 2012; SILVA *et al.*, 2018; ANDRADE, 2014; MACHADO, 2014; ECHEVERRI, 2012 apud VIGLIONE, 2018).

3.4.2 Características do rejeito de minério de ferro

A depender do processo empregado no beneficiamento do minério de ferro, o rejeito gerado pode apresentar diferentes distribuições granulométricas e características físico-químicas. Conforme Guimarães *et al.*, (2011), avaliando-se algumas minas do Quadrilátero Ferrífero, é possível identificar as faixas granulométricas para lamas, rejeito de flotação e rejeito da concentração magnética (Figura 8).

Figura 8 - Distribuição granulométrica de diferentes tipos de rejeitos de algumas minerações do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: (GUIMARÃES *et al.*, 2011).

Espósito (2000) em seus estudos observou 10 a 15% dos sólidos por hematita nos rejeitos de minério de ferro, contendo massa específica dos grãos (ps) de

aproximadamente 5,25 g/cm³, enquanto o restante é formado por quartzo com ps entre 2,65 e 2,70 g/cm³. Pereira (2005) também indicou composições químicas caracterizadas basicamente por ferro (Fe) e sílica (SiO₂) e, em menor proporção, alumina (Al₂O₃) em rejeitos gerados em diferentes processos de beneficiamento de minas localizadas na região do Quadrilátero Ferrífero. Geralmente a sílica presente é proveniente do quartzo e frações de ferro são provenientes da hematita, goethita ou magnetita e alumínio na gibsita.

Destaca-se que a proporção desses materiais pode variar para diferentes tipos de rejeito e também para diferentes frações granulométricas da amostra, influenciando expressivamente a massa específica do rejeito de minério de ferro. Um exemplo pode ser observado na comparação das parcelas de rejeito da barragem de Fundão e da barragem B-I, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Características do rejeito das barragens de Fundão e B-I.

Características dos rejeitos	Barragem do Fundão	Barragem B-I
Fração granulométrica predominante	silte	areia fina
Principais minerais (lama)	hematita (43%) goethita (31%) quartzo (19%) caulinita (4,4%)	hematita (48%) goethita (25,5%) quartzo (10%) caulinita (9%)
Massa específica (g/cm ³)	grosso - 2,85 lama - 3,95	grosso - 4,90 lama - 4,00
Plasticidade	grosso - não plástico lama - 7 a 11%	grosso - não plástico lama - 18%

Fonte: adaptado (PEREIRA; PICANÇO, 2019).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os procedimentos metodológicos propostos envolvem o desenvolvimento de ensaios em laboratório para caracterizar uma amostra de rejeito de ferro filtrada, avaliar a velocidade de queda da partícula com base na concentração de sedimentos e iniciar a avaliação de um método para o estudo da sedimentação em um reservatório de contenção.

4.1 Caracterização das amostras

4.1.1 Rejeito de minério de ferro

As amostras de rejeito de minério de ferro utilizadas nos experimentos foram caracterizadas quanto às características físico-químicas mais relevantes para os parâmetros hidráulicos. Conforme apresentado por Julien (2010), para o estudo de transporte de sedimentos é preciso conhecer a distribuição granulométrica do sedimento, a concentração de sedimentos em suspensão (para as partículas finas), a esfericidade e forma de grãos individuais, sua composição mineral e peso específico.

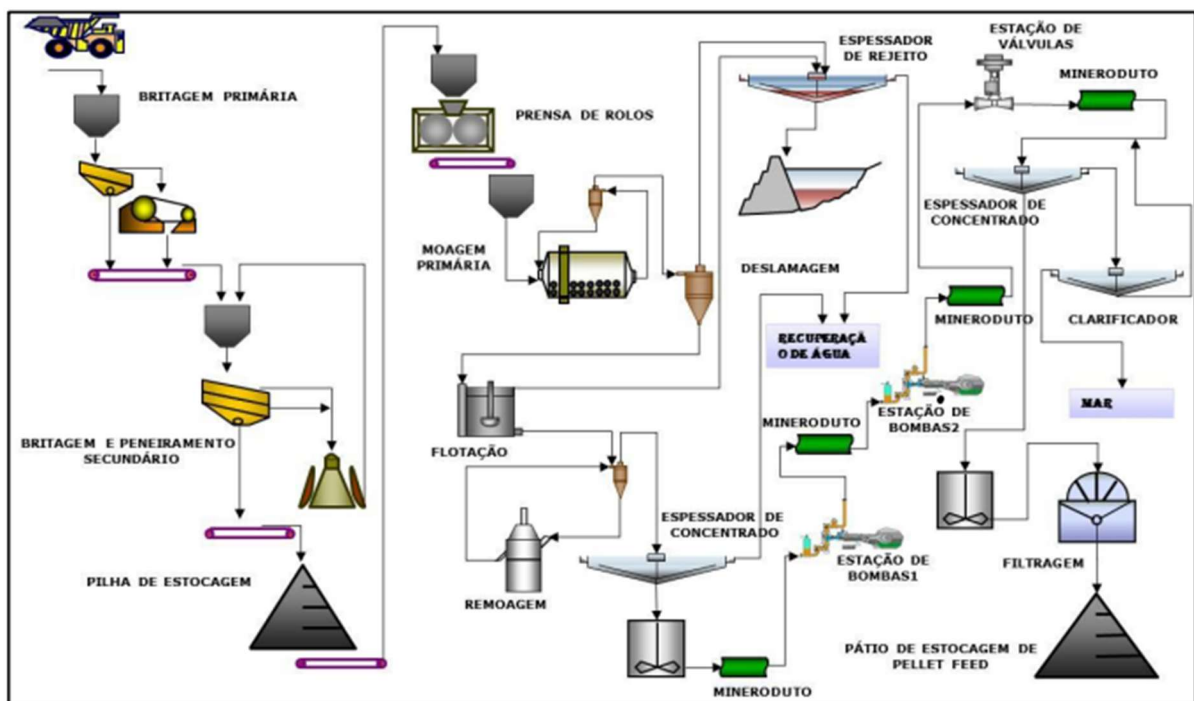
O rejeito utilizado na pesquisa foi obtido de uma mina localizada em Minas Gerais, onde o processo de beneficiamento existente é dividido em duas principais etapas: via seca e via úmida (Figura 9). Segundo Braga (2021), a via seca inicia-se com a britagem primária, composta por dois britadores de mandíbulas operando em paralelo. Em seguida, ocorre o peneiramento e a britagem secundária em circuito fechado, envolvendo quatro peneiras e quatro britadores cônicos. O material retido no peneiramento alimenta os britadores secundários (carga circulante), enquanto o material passante (< 22 mm) é direcionado para a pilha pulmão. Nessa pilha, um sistema de alimentadores de sapatas direciona o material para três prensas de rolos operando em paralelo.

A etapa subsequente, chamada via úmida, inclui a adição de água para otimizar o beneficiamento e transporte do minério. O processo tem início com a moagem primária, utilizando dois moinhos de bolas operando em circuito fechado e direto com hidrociclones. O produto da moagem é encaminhado para duas etapas de deslamagem por hidrociclones, preparando o material para a flotação. A flotação ocorre em células mecânicas em um circuito composto por etapas *Rougher*, *Cleaner*

e *Scavenger*. O produto da flotação passa por uma etapa de remoagem em moinhos verticais, ajustando a granulometria do concentrado para atender as especificações de mercado e requisitos de bombeamento do mineroduto. A remoagem opera em circuito fechado e reverso com hidrociclones.

Finalmente, o produto da remoagem é encaminhado para um espessador, que recupera parte da água e ajusta o percentual de sólidos da polpa para o bombeamento através do mineroduto. No porto, a polpa é filtrada em filtros cerâmicos e adequada conforme as especificações de umidade para o transporte em navios.

Figura 9 - Fluxograma do beneficiamento da mina.



Fonte: (BRAGA, 2021).

Atualmente, os rejeitos gerados são caracterizados como: lamas e rejeitos da flotação. A lama proveniente da etapa de deslamagem representa entre 10% e 15% de todo o rejeito gerado e possui granulometria extremamente fina ($65\% < 7 \mu\text{m}$). Já o rejeito da flotação corresponde aos demais 85% a 90% da massa de rejeito gerada e possui granulometria mais grossa quando comparado a lama. Somente o rejeito da flotação é direcionado para um espessador, que promove a recuperação da água de processo e direciona o material adensado para a barragem de rejeitos existente. Recentemente, a mina incorporou a etapa de filtragem a vácuo após a etapa de espessamento, com o objetivo de disposição do rejeito a seco em pilha. No entanto, o rejeito da

deslamagem não é direcionado para a etapa de filtragem e continuará a ser encaminhado diretamente para a barragem. As pilhas de rejeito filtrado, ou *dry stacking*, garantem maior estabilidade geotécnica e, conseqüentemente, maior segurança.

A amostra de rejeito que foi concedida para a pesquisa foi coletada em uma Pilha de Rejeito e Estéril experimental, de um empreendimento, localizado em Minas Gerais.

Os aspectos mineralógicos e sua composição química foram caracterizados segundo estudos de Braga (2021) e Buzzi *et al.*, (2020).

Previamente à separação do material em faixas granulométricas para condução dos experimentos, o material foi devidamente exposto para secagem. Na etapa de peneiramento utilizou-se uma mesa vibratória de peneiras granulométricas *Solotest*, disponível no Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) da UFMG. As peneiras seguem os padrões ASTM/ABNT NBR 7181 ou ASTM, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Faixas granulométricas adotadas para os ensaios de velocidade de queda.

Faixas granulométricas (mm)	Classificação das frações granulométricas	Método de ensaio proposto
0,500 -0,425	areia média	Coluna de sedimentação. Análise da velocidade de queda do grão de minério de ferro.
0,425-0,355		
0,355-0,300		
0,300-0,250		
0,250-0,150	areia fina	
0,250-0,125		
0,125-0,090	areia muito fina	
0,090-0,063		
<0,063 ¹	silte e argila	Ensaio de provetas. Análise da velocidade de queda do rejeito minério de ferro para diferentes concentrações.

¹ A classificação de silte inicia-se no diâmetro 0,050 mm segundo a NBR 7181. No entanto, por questões de disponibilidade de peneiras, foi adotada a granulometria de 0,063 mm de corte.

A determinação da densidade real dos grãos (Gs) de cada amostra foi realizada por meio de picnômetro simples pela LOCTEST Laboratório de Geotecnia.

4.1.2 Sedimento do reservatório da PCH de Salto do Paraopeba

A amostra de sedimento coletada no reservatório da PCH de Salto do Paraopeba, localizado na região de cabeceira do rio Paraopeba entre os municípios de Jeceaba e

Melo Franco, em Minas Gerais, apresenta como principais características as informações descritas na Tabela 8, conforme estudo de Comini de Andrade e Zegarra (2020). No âmbito desta pesquisa, foram utilizados os dados informados em estudos prévios com exceção do fator de forma, que foi obtido através de análise de imagens de Microscópio Eletrônico de Varredura, conforme item a seguir (4.1.3).

Tabela 8 - Característica da amostra de areia coletada no reservatório da PCH de Salto do Paraopeba.

Faixa granulométrica (mm)	Diâmetro médio (mm)	Massa retida (g)	Distribuição granulométrica	Massa específica real do grão (g/cm³)
<2,000 – 1,200>	1,600	14,52	1,5%	2,875
<1,200 – 0,600>	0,900	224,2	22,4%	
<0,600 – 0,420>	0,510	295,0	29,5%	
<0,420 – 0,250>	0,330	239,3	23,9%	
<0,250 – 0,150>	0,200	113,6	11,4%	
<0,150 – 0,075>	0,113	84,98	8,5%	
Fundo	-	27,88	2,8%	

Fonte: (COMINI DE ANDRADE; ZEGARRA, 2020) .

Destaca-se que a massa específica do sedimento coletado no reservatório da PCH de Salto do Paraopeba é elevada em referência ao quartzo (2,650 g/cm³), indicando a presença de minerais mais densos do sedimento.

Em 2019, a CPRM realizou um estudo de caracterização geoquímica da água, sedimento de fundo e do solo de toda a bacia do rio Paraopeba. Segundo o relatório, a região de cabeceira da bacia onde o reservatório da PCH está localizado, apresenta anomalia de valores acima da legislação de parâmetro como Ferro (Fe), Manganês (Mn), Alumínio (Al) e Mercúrio (Hg) nos sedimentos de fundo e na água (CPRM, 2019). O relatório também aponta que a maioria dessas concentrações elevadas provavelmente possui origem geogênica, ou seja, natural, devido aos elevados teores de fundo de elementos em rochas e solos, uma vez que se trata de região com importantes jazimentos de ferro e ouro, comumente chamada de Quadrilátero Ferrífero. Portanto, a possível presença dos minerais apontados no relatório explica o valor mais elevado de massa específica do grão.

Desta forma, para melhor caracterização da amostra de sedimento foi realizado o ensaio de espectroscopia por dispersão de energia de raios-x (EDS) com o uso da microscopia eletrônica de varredura ThermoFisher APREO 2C FEG, no Laboratório

de Microscopia da UFMG. A técnica permitiu gerar o mapeamento químico de algumas partículas da amostra de sedimentos.

A preparação de amostras consiste na montagem sobre suporte (*stub*) é realizada usando fita adesiva de carbono. Segundo o laboratório, a técnica discrimina em energia os fótons de raios-X emitidos pela amostra em decorrência da interação do feixe eletrônico com os átomos nela presentes. Desta maneira, a análise deste sinal disperso em energia (espectro) permite a identificação e a quantificação destes elementos através da aquisição de dados.

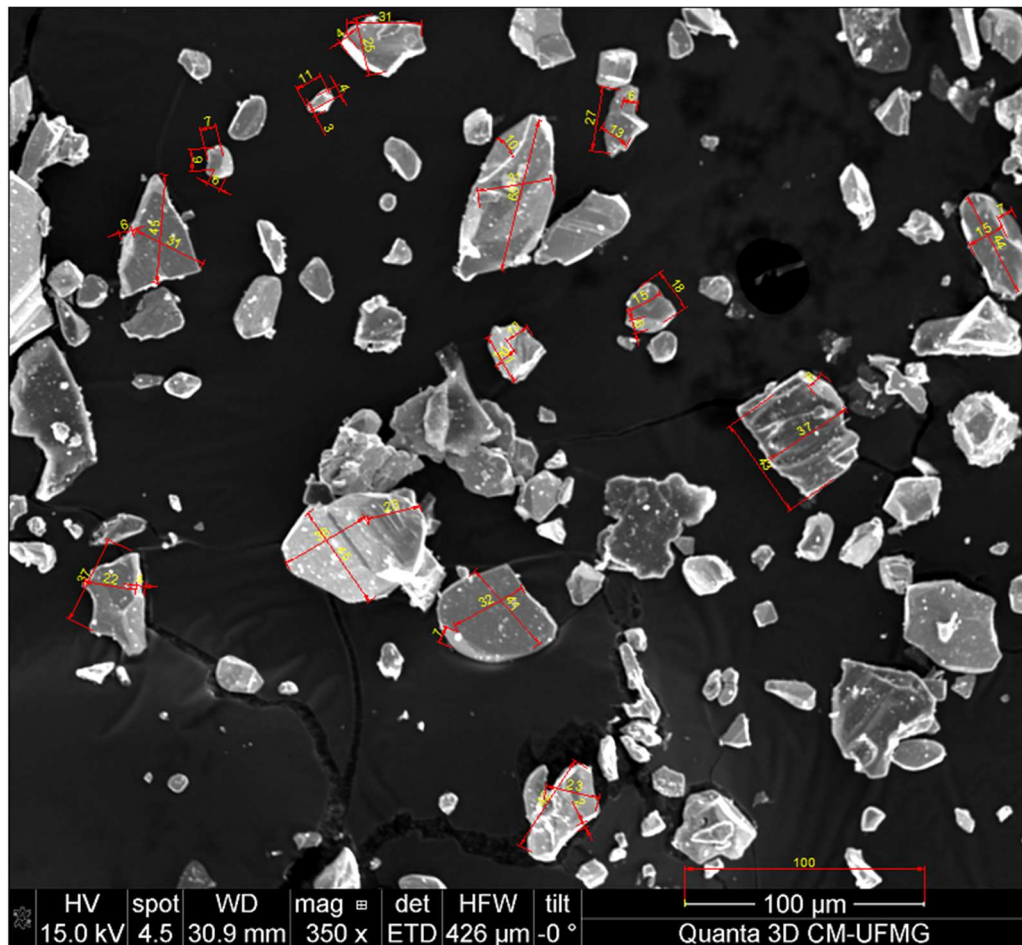
4.1.3 Fator de forma e esfericidade do sedimento

Também foram realizados ensaios por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura FEI Quanta 200 FEG pertencente ao Laboratório de Microscopia da UFMG. A preparação de amostras segue o mesmo procedimento realizado para o ensaio de EDS-MEV para a caracterização do mapeamento químico do sedimento da PCH de Salto do Paraopeba.

A imagem gerada por um MEV é formada através da interação do feixe eletrônico com a superfície da amostra. O feixe espalha inelasticamente elétrons, arrancando-os (elétrons secundários) dos átomos que compõem a amostra. Apenas os elétrons espalhados na superfície da amostra são capazes de escapar e atingir o detector (uma tela de fósforo posicionada próxima da amostra). Esse sinal é coletado durante a varredura, gerando uma imagem de elétrons secundários, que contém informação da morfologia superficial da amostra (CM-UFMG, 2024).

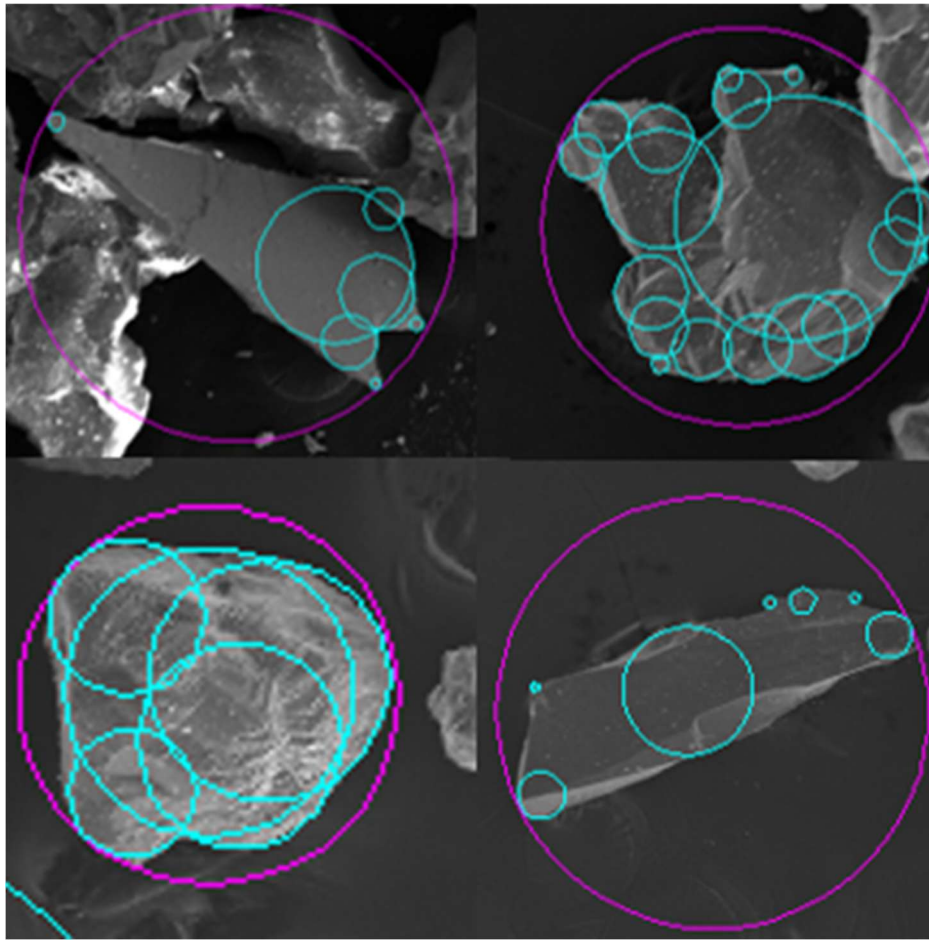
O fator de forma da partícula (COREY, 1949) foi obtido através da obtenção das dimensões dos três eixos: maior (l_a), intermediário (l_b) e menor (l_c). A mensuração dos eixos das partículas ocorreu através do GstarCAD 2021, considerando as projeções do sedimento para caracterizar a área superficial e a profundidade da partícula, conforme exemplificado pela Figura 10.

Figura 10 - Exemplo da obtenção dos eixos das partículas através das imagens do MEV de rejeito de minério de ferro.



A esfericidade da partícula (P) foi estimada segundo a equação de Wadell (1933), equação (17), que estabelece a relação entre raio do diâmetro de um círculo da área de projeção da partícula com os diâmetros de círculos menos circunscritos na área de projeção. A Figura 11 apresenta um exemplo da obtenção dos raios dos círculos circunscritos (azul claro) e círculo da área projetada da partícula (magenta).

Figura 11 - Exemplo da obtenção da esfericidade da partícula (P) através das imagens do MEV – rejeito de minério de ferro.



4.2 Velocidade de queda

4.2.1 Velocidade de queda da partícula

A análise da velocidade de queda de uma partícula deve ser realizada garantindo a representatividade da amostra, a precisão das medições para a ordem de grandeza a ser estudada e as condições ambientais, controle de temperatura, características do fluido e condições de escoamento do aparato de medição.

As técnicas de medição *in situ* procuram estabelecer com maior fidelidade as condições ambientais e de amostragem, como os tubos de Owen, tubos de sedimentação e técnicas de difração a laser e vídeo (MANTOVANELLI; RIDD, 2006). No entanto, mesmo com diversos avanços científicos, ainda apresentam um elevado custo de medições, além das dificuldades em quantificar e prever as propriedades complexas dos agregados sem perturbar a amostragem, eliminando ou reduzindo os

níveis de turbulência naturais (BERLAMONT et al., 1993). As perturbações das amostragens acarretam na alteração da formação de flocos (MILLIGAN, 1995; FUGATE E FRIEDRICHS, 2002 apud MANTOVANELLI; RIDD, 2006) e na distorção do padrão de fluxo (ALLEN, 1981).

Dadas as condições citadas, experimentos conduzidos em laboratório são amplamente utilizados para a definição da velocidade de queda, pois permitem maior controle das condições de medição e são métodos acessíveis. O mais comum é a utilização de coluna de decantação, que possibilita a obtenção da velocidade de queda do grão através do pós-processamento de imagens. Portanto, diversos métodos de processamento de imagens e vídeos são utilizados em laboratório para garantir a melhor resolução e precisão da velocidade de queda da partícula, podendo, inclusive, serem realizados através de *softwares* gratuitos como o *Kinovea* ou *Tracker* (CAMPELLO, 2017; FRAGA, 2023).

O *Tracker* é uma ferramenta gratuita de análise e modelagem de vídeo construída no *framework* Java de Física de Código Aberto (OSP - *Open Source Physics*). Um modelo de rastreamento de partículas é um modelo matemático de uma massa pontual. Este foi o *software* escolhido para utilização na pesquisa deste trabalho.

A coluna de sedimentação de acrílico utilizado para os ensaios de avaliação da velocidade de queda da parcela de rejeito possui 240 cm de altura, com base quadrada interna de 30 cm x 30 cm, instalado sobre uma estrutura metálica (Figura 12). No interior do decantador foi posicionada uma haste de 0,90 cm de altura, utilizada para calibração das imagens obtidas.

Figura 12 - Foto do aparato experimental utilizado para a determinação da velocidade de queda das partículas.



Na porção superior da coluna de sedimentação há um termômetro químico, composto por mercúrio (Hg) graduado com uma escala de -10 a 150 graus Celsius, para o controle da temperatura da água durante o experimento.

Para os registros de imagens, foi utilizado o *smartphone* Iphone 14, equipado com um sistema de câmeras de grande-angular de 12 MP: 26 mm, abertura $f/1.5$, estabilização óptica de imagem por deslocamento de sensor, Focus Pixels a 100%.

As filmagens foram realizadas em câmera lenta de 1080p a 240 qps, e, durante o processo, para melhorar o contraste das partículas, foi posicionado atrás do decantador um papel azul e dois holofotes LED SMD de 100w de potência próximo à haste.

Uma mangueira foi usada para encher o interior do decantador com água, de maneira a gerar a turbulência mínima na coluna líquido e evitar a formação de bolhas na região da filmagem, o que poderia dificultar a visualização. O experimento consistiu em posicionar uma pequena quantidade de sedimentos lançados lentamente para evitar perturbações na entrada e buscar velocidades iniciais nulas.

Foram realizadas 5 filmagens para cada faixa granulométrica do rejeito de minério de ferro e apenas 3 filmagens para o sedimento de Salto do Paraopeba. A menor quantidade de ensaios para o sedimento de Salto do Paraopeba foi definida a partir da consideração que o foco da pesquisa foi voltado para o rejeito de minério de ferro, sendo o sedimento do reservatório foi utilizado para avaliar o método empregado já que foi utilizado em outras pesquisas relativas a velocidade de queda da partícula, citam-se os estudos de Comini (2017), Andrade (2020) e Fraga (2023).

Para cada gravação fez-se a seleção de 5 partículas, totalizando 25 para o rejeito e 15 para a areia, para cada faixa granulométrica. A velocidade de cada sedimento foi obtida pela média entre as velocidades instantâneas a cada posição registrada.

Após a filmagem, a edição dos vídeos através das ferramentas do próprio Iphone 14 utilizado, permitiram aumentar definição, nitidez, saturação e contraste das imagens e facilitar a visualização das partículas. Adicionalmente, os vídeos realizados para as partículas finas foram revertidos para 30qps, considerando a baixa diferenciação entre os quadros em câmera lenta, que aumentavam a incerteza da trajetória da partícula.

Para o pós-processamento de imagens das filmagens utilizou-se o *software* gratuito Tracker (FRAGA, 2023), que permitiu a análise e modelagem de vídeo construída no *framework* Java de Física de Código Aberto (OSP - *Open Source Physics*).

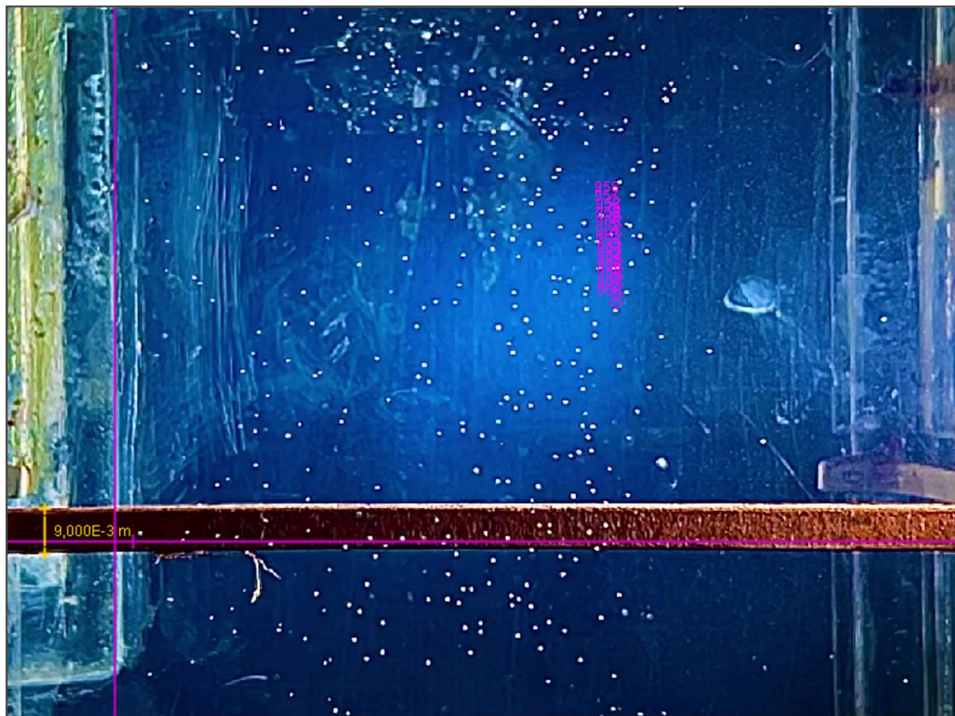
No que tange ao processo de definir o trajeto da partícula, foi realizado de forma manual, sob o entendimento de que um modelo de rastreamento de partículas é um

modelo matemático de massa pontual, com vistas a avaliar o movimento de uma partícula quadro a quadro, segundo o sistema de coordenadas definido previamente, e também distâncias verticais calibradas com a haste.

Realizado o ensaio para uma faixa granulométrica, foi escolhido o trecho do vídeo que capturou maior densidade de partículas, sendo desconsideradas as imagens de início e fim. Durante a passagem da nuvem de pontos foram selecionadas partículas em diferentes intervalos de tempo para cobrir a representatividade dos diâmetros de análise.

Com base na posição da partícula em cada quadro e considerando a captura das imagens em câmera lenta e a uma frequência de 240 quadros por segundo ou 60 quadros por segundo, foi possível calcular as velocidades instantâneas, dividindo a diferença de posição pela diferença de tempo entre dois quadros consecutivos. A velocidade final da partícula foi determinada pela média das velocidades instantâneas. Esse processo é exemplificado na Figura 13.

Figura 13 - Determinação da velocidade queda no *software* Tracker – Rejeito de minério de ferro (0,250 mm e 0,150 mm).



4.2.2 Velocidade de Queda para diferentes concentrações

No caso de sedimentos finos do rejeito, o processamento de imagens não é o melhor método de medição, exatamente pela dificuldade de visualização e rastreamento da partícula, sendo necessário recorrer a técnicas onerosas e de elevada precisão.

Como alternativa, ainda que simplificada, o método com provetas é bastante aplicado, verificando o tempo e a altura da interface de clarificado até o tempo final, conforme trabalho realizado por (ZHANG *et al.*, 2020).

Os experimentos foram definidos para provetas de 100 mL, com as concentrações volumétricas indicadas na Tabela 9. Para cada concentração foram realizados 5 ensaios.

Tabela 9 – Concentrações definidas para ensaio de provetas.

Concentração Volumétrica (%)	Volume de água (L)	Massa rejeito (g)	Concentração (g/L)
0,013	0,1000	0,052	0,517
0,05	0,1000	0,199	1,985
0,13	0,0999	0,517	5,149
0,25	0,0998	0,994	9,867
0,5	0,0995	1,988	19,59
1,0	0,0990	3,976	38,61
5,0	0,0950	19,88	173,1
11	0,0900	39,76	306,4
25	0,0800	79,52	498,5

O método com provetas consiste em agitar a amostra até formar uma polpa homogênea e realizar registros fotográficos a uma frequência determinada, sendo modificada durante o andamento do ensaio para concentrações volumétricas superiores a 0,5%. No experimento realizado, foi utilizado um *tablet* Samsung A7 e o aplicativo *Timer Camera* para a captura de imagens, inicialmente sob um intervalo de tempo de 10 segundos. Após 10 minutos, o intervalo entre as fotos foi alterado para 1 minuto, após uma hora, o intervalo aumentou para 10 minutos, até alcançar o intervalo de uma hora.

Através das imagens obtidas foi possível avaliar as alturas da interface de clarificação no intervalo de tempo. O método é realizado até a clarificação total da mistura. Sendo

a velocidade de queda calculada a partir do intervalo de tempo até a atingir o nível de deposição de sedimento, conforme Figura 14.

Figura 14 - Ensaio de Velocidade de queda com provetas.



Foram avaliados no ensaio dois tempos distintos. O primeiro até a mistura perder a tonalidade preta/acinzentada, que indica a parcela de minério (Fe_2O_3), e permanecer somente a tonalidade laranja. E o segundo, até a clarificação completa, conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Análise de velocidade de queda entre (a) o tempo inicial após a mistura homogênea até atingir: (b) a parcela de rejeito acinzentada e (c) clarificação total.



4.2.3 Teste de aderência para equações de Velocidade de Queda

Para cada faixa granulométrica o experimento foi realizado cinco vezes, visando verificar a precisão dos equipamentos utilizados e a adequada avaliação dos

resultados. A partir dos dados obtidos nos experimentos os resultados foram submetidos a uma análise de aderência entre as equações expressas na Tabela 1 e na Tabela 3 para a análise da velocidade de queda da partícula, e entre as equações constantes na Tabela 4 para a análise da velocidade de queda em diferentes concentrações. Esta avaliação da aderência considerou o coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (N-S) (NASH *et al.*, 1970), assim como a raiz do erro quadrático médio (RMSE).

A função N-S mostra se os valores calculados através das equações existentes se encontram próximos dos valores medidos (MCCUEN, 1973). O resultado pode variar de infinitamente negativa a um, sendo que os valores mais próximos de um indicam um melhor ajuste. Valores de N-S próximos a zero indicam que se aproximam da média. A equação do coeficiente é apresentada na Equação (18), em que ω_i^{exp} são os valores de velocidade de queda obtidos experimentalmente e ω_i^{calc} os valores de velocidade de queda estimados através das equações empíricas selecionadas.

$$N - S = 1 - \frac{\sum_i^n [\omega_i^{exp} - \omega_i^{calc}]^2}{\sum_i^n [\omega_i^{exp} - \overline{\omega_i^{calc}}]^2} \quad (18)$$

Para a raiz do erro quadrático médio (RMSE) o melhor ajuste dos valores medidos com os valores calculados é indicado pela Equação (19), em que ω_i^{exp} são os valores de velocidade de queda obtidos experimentalmente e ω_i^{calc} os valores de velocidade de queda estimados através das equações empíricas selecionadas.

$$RMSE = \frac{\sum_i^n [\omega_i^{exp} - \omega_i^{calc}]^2}{n} \quad (19)$$

4.2.4 Deposição do Rejeito de minério de ferro em um canal

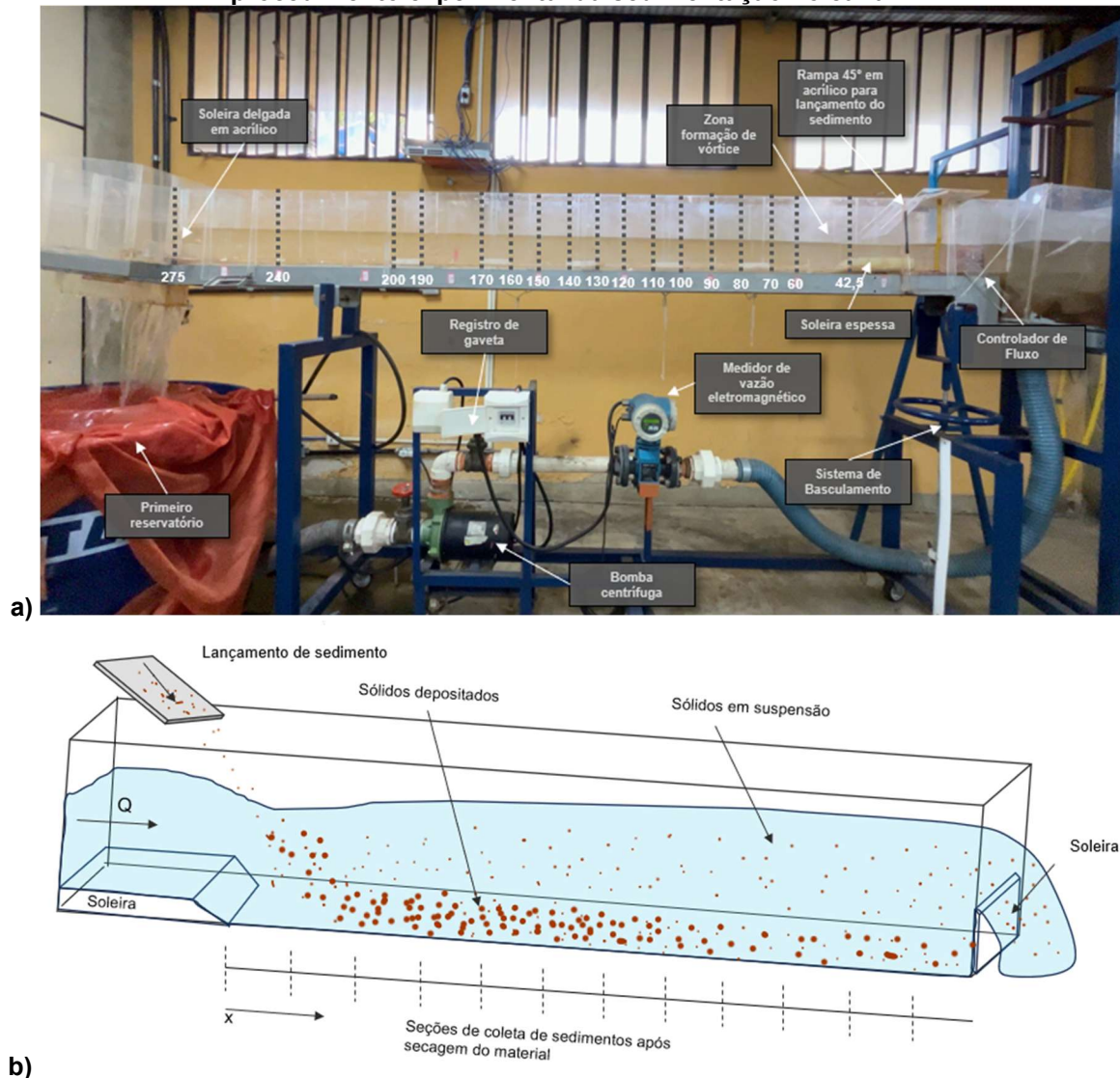
Os resultados obtidos de velocidade de queda da partícula e velocidade de queda referente a concentração são muito relevantes, pois tratam de parâmetros intensamente utilizados nas equações teóricas e empíricas para descrever os processos de transporte e deposição de sedimentos. No entanto, a análise experimental de partículas depositando em um fluido em repouso, dificilmente ocorre quando se trata de transporte fluvial. Dessa forma, a análise deve incorporar o efeito

da turbulência do escoamento pelas iterações entre as partículas e pelas diferenças de densidades formadas pela mistura e o fluido circundante ambiente.

Portanto, para a avaliação do processo de sedimentação do rejeito de minério de ferro em um escoamento, foram realizados ensaios em um aparato (Figura 16) composto por:

- Canal acrílico de 3,0 m de comprimento, 0,14 m de largura e 0,25 m de altura;
- Um sistema de bombeamento, com medidor eletromagnético e registro gaveta para controle da vazão;
- Um sistema de basculamento graduado para definir a declividade do canal e um nivelador a laser autonivelante para auxílio do ajuste da declividade;
- Dois reservatórios em série, sendo o primeiro com a função de reter os sedimentos e o segundo para permitir o bombeamento da água;
- Um tranquilizador de fluxo no emboque do canal realizado através de empilhamento de canudos de plásticos;
- Uma soleira de acrílico de 0,07 m de altura na saída do canal para reproduzir condições hidráulicas similares às de um reservatório (formação de remanso).

Figura 16 - a) Aparato experimental composto por um canal retangular, bomba centrífuga, registro de gaveta, medidor de vazão eletromagnético e reservatórios, b) Detalhe do procedimento experimental da sedimentação no canal.



Para o lançamento de sedimentos no canal foi confeccionada uma pequena estrutura em acrílico com ângulo de 45° para projetar o sedimento em uma camada uniforme, no menor intervalo de tempo e para simular a entrada de um pulso de concentração.

As análises deste experimento foram preliminares, contribuindo para definição do método a ser aplicado em pesquisas futuras no CPH, referentes à deposição de sedimentos em um canal, com o intuito de documentar as principais dificuldades, resultados obtidos e propor melhorias para possibilitar a aplicação em maiores escalas. Portanto, a análise considerou apenas uma subclasse granulométrica do rejeito de minério de ferro (entre 0,125 mm e 0,090 mm), areia muito fina, e apenas

uma concentração volumétrica igual a 5%. A subclasse granulométrica foi determinada por se tratar de uma classe representativa e a concentração se aproximava dos valores obtidos no rio Paraopeba poucos dias após os eventos de ruptura da barragem B-I.

As principais informações relativas às condições iniciais definidas para o experimento estão consolidadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Condições definidas para o ensaio de deposição de sedimentos em um canal.

Parâmetro	Valor
Comprimento	275 cm
Altura	25 cm
largura	14 cm
Soleira entrada	5,0 cm
Soleira jusante	7,8 cm
Declividade	0,005 m/m
Vazão	2,00 L/s
Profundidade do escoamento	0,11 m
Velocidade trecho soleira	0,26 m/s
Velocidade canal	0,14 m/s
Faixa granulométrica	0,125 mm -0,090 mm
Massa rejeito lançada	200 g
Concentração volumétrica ¹ Cv	5,0 %
Concentração em massa	131 g/L

¹Concentração definida para o volume de canal nos primeiros 0,1 m.

Esvaziado o canal ao final do experimento e após a secagem completa do material depositado, pôde-se avaliar como o material se distribuiu em diferentes trechos. O material foi coletado e pesado ao longo de toda a extensão do canal, e a diferença do sedimento inicial e o coletado, foi considerado como sedimento transportado em suspensão (*wash load*). O procedimento de coleta do sedimento encontra-se na Figura 17.

Figura 17 - Coleta do sedimento depositado no canal.



Também foram realizadas análises de imagens das filmagens obtidas dos experimentos, para melhor compreensão da passagem de corrente de densidade, do processo de deposição no canal, da formação de mistura, da formação de vórtices e do movimento da pluma de concentração ao longo do canal.

Por fim, os resultados foram comparados com as equações teóricas de eficiência de retenção (CAMP, 1945; CHEN, 1975; HUBER; DICKINSON, 1988), não abrangendo as equações empíricas de eficiência de retenção devido à baixa representatividade do experimento em relação a reservatórios naturais. Além disso, a análise da turbulência do escoamento foi brevemente discutida avaliando-se o número de Richardson (Ri) e características da corrente de densidade.

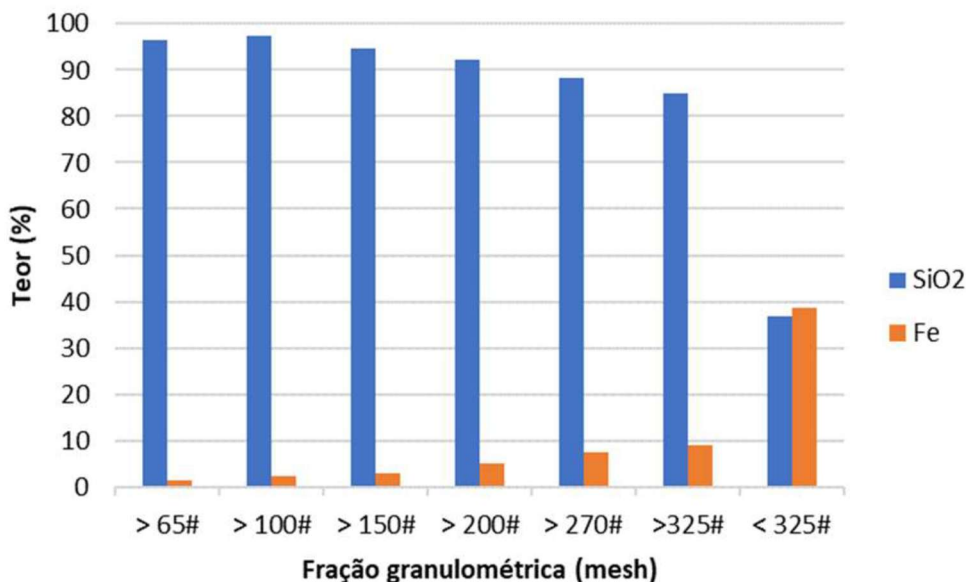
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das amostras

5.1.1 Rejeito de minério de Ferro

O rejeito de minério de ferro em diferentes etapas do beneficiamento da mina foi caracterizado por Buzzi *et al.* (2020). A composição mineralógica da amostra do Rejeito Total *Underflow* do Espessador caracteriza o rejeito que é encaminhado para a etapa de filtragem. Segundo os autores, a composição química majoritária é a sílica (SiO_2) e o ferro (Fe), sendo que a SiO_2 se encontra presente na forma de quartzo e o Fe na forma de hematita. A sílica é proveniente do quartzo com presença de 70,9% no rejeito, garantindo o caráter arenoso, uma vez que esta é a fase mineral presente nas areias. Já o Fe está presente em menor teor (18,2 %) e se concentra nas frações mais finas, conforme indicado na Figura 18. O ferro presente na amostra encontra-se na forma de hematita, também nas morfologias lamelar e granular monocristalina.

Figura 18 - Teor de Sílica (SiO_2) e Ferro (Fe) nas diferentes frações granulométricas do rejeito de minério de ferro.



Fonte: (BRAGA, 2021)

A formação ferrífera onde está localizada a mina onde se obteve o material de pesquisa apresenta cor cinza clara a cinza escura, localmente negra azulada, formada por alternância de camadas quartzosas e ferruginosas ricas em hematita especular e granular e, pontualmente, magnetita. A sequência estratigráfica observada é brusca e em alguns pontos próximos à superfície formam-se saprolitos argilosos de cor variada,

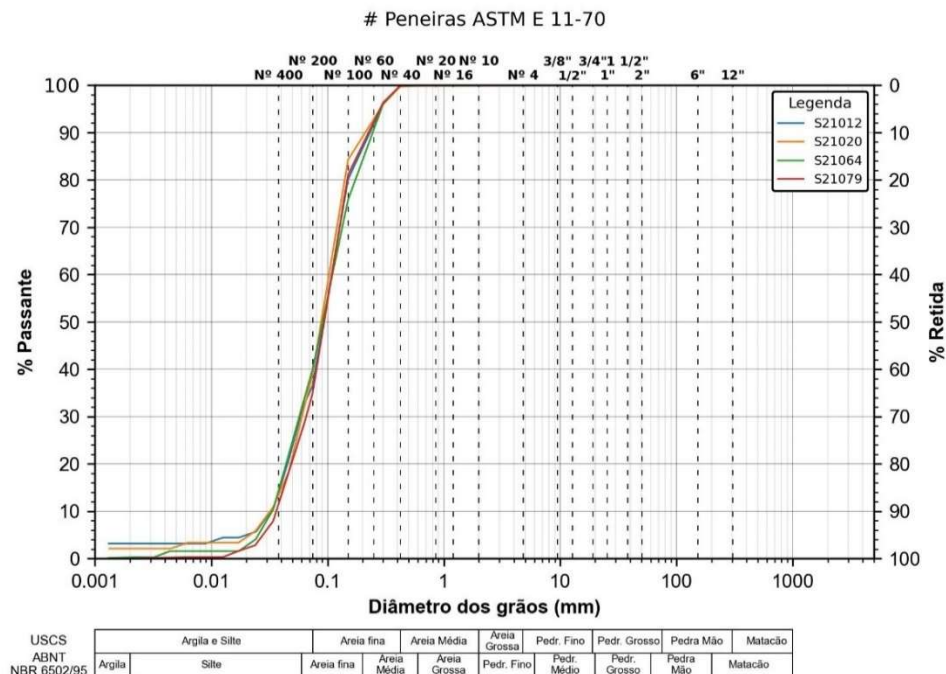
do vermelho ao amarelo e ao ocre, indicando a cobertura por canga, um importante contaminante da litologia (DUARTE, 2021). As cores indicadas confirmam a presença de quartzo nas parcelas arenosas do rejeito e maior parcela de hematita na granulometria fina, conforme Figura 19.

Figura 19 - Cores das amostras de rejeito de minério de ferro em diferentes subclasses granulométricas.



As curvas granulométricas de cinco amostras de rejeito filtrado indicaram baixa variabilidade granulométrica significativa e possui características de uma areia fina siltosa, conforme Figura 20.

Figura 20 - Curvas granulométricas do rejeito filtrado.



Fonte: Documento interno da mineradora (2023).

A massa específica do grão de rejeito para a amostra total de rejeito é de 2,83 g/cm³ (documento interno, 2023). No entanto, considerando a heterogeneidade da amostra

referente a porção arenosa ($> 0,063$ mm) composta majoritariamente por sílica (quartzo) e a porção de finos ($< 0,063$ mm) composta por uma mistura de sílica e ferro (quartzo e hematita), foram realizados testes de massa específica por meio de um picnômetro simples pela LOCTEST Laboratório de Geotecnia para diferentes faixas granulométricas, conforme Tabela 11.

Tabela 11 - Massa específica do rejeito de minério de ferro filtrado.

Amostra de rejeito de minério de ferro filtrado	Massa Específica (g/cm³)
Amostra total	2,83
Rejeito peneirado entre 0,150 mm e 0,300 mm	2,68
Rejeito peneirado entre 0,063 mm e 0,150 mm	2,73
Rejeito peneirado $< 0,063$ mm	3,97

Fonte: (Documento interno; 2023; LOCTEST, 2024).

Conforme previsto, a presença de ferro na porção fina de rejeito eleva em aproximadamente 50% a massa específica real do grão. A presença de hematita apenas na fração fina do rejeito ocorre como indicativo da eficiência do processo de beneficiamento de minério de ferro. Diversos estudos são desenvolvidos para aumentar o processo tecnológico de beneficiamento para aproveitamento do concentrado de minério de ferro nas porções ultrafinas (*Pallet feed fines*), como a utilização de flotação catiônica reversa (ROCHA; PERES, 2009).

A composição mineralógica do rejeito de minério de ferro permitiu classificar o sedimento em duas amostras distintas. A primeira apresenta característica de uma areia com presença de quartzo e próxima a densidade de sedimentos naturais (2,65 g/cm³). A segunda, formada pela fração fina, com alto teor de ferro, e assim, maior massa específica.

No entanto, apesar do rejeito de minério de ferro apresentar características de um sedimento natural é importante ressaltar que foi um sedimento “fabricado” através do processo de beneficiamento e não “esculpido” naturalmente por intemperismo. Ratificando que a análise de forma do grão do rejeito é bastante relevante para a caracterização do sedimento.

5.1.2 Sedimento do reservatório da PCH de Salto do Paraopeba

O ensaio de EDS-MEV realizado permitiu avaliar os principais minerais presentes na amostra que justificariam o valor de massa específica do sedimento ($2,875 \text{ g/cm}^3$) superior à de sílica ($2,650 \text{ g/cm}^3$), normalmente considerada como sedimento natural.

Os resultados de EDS são apresentados na Figura 21 para as partículas identificadas como predominantemente de sílica e pequenos traços de Alumínio e Ferro. Já a Figura 22 apresenta duas partículas em que ainda há a predominância de sílica, mas a presença de ferro e alumínio é mais marcante e já aparecem mais minerais traços (manganês, magnésio, fósforo, titânio, cálcio). A Figura 23 apresenta uma relação mais equilibrada de alumínio e sílica como elementos predominantes e com presença mais marcante dos mesmos minerais observados na Figura 22.

Desta forma, a notável presença de alumínio em algumas partículas do sedimento coletado no reservatório da PCH de Salto do Paraopeba, assim como outros elementos em menor escala, justificam a massa específica da amostra, indo de encontro aos dados publicados pela CPRM em 2019.

Figura 21 – Partículas do sedimento da PCH de Salto do Paraopeba com presença significativa de sílica e traços de alumínio e/ou ferro.

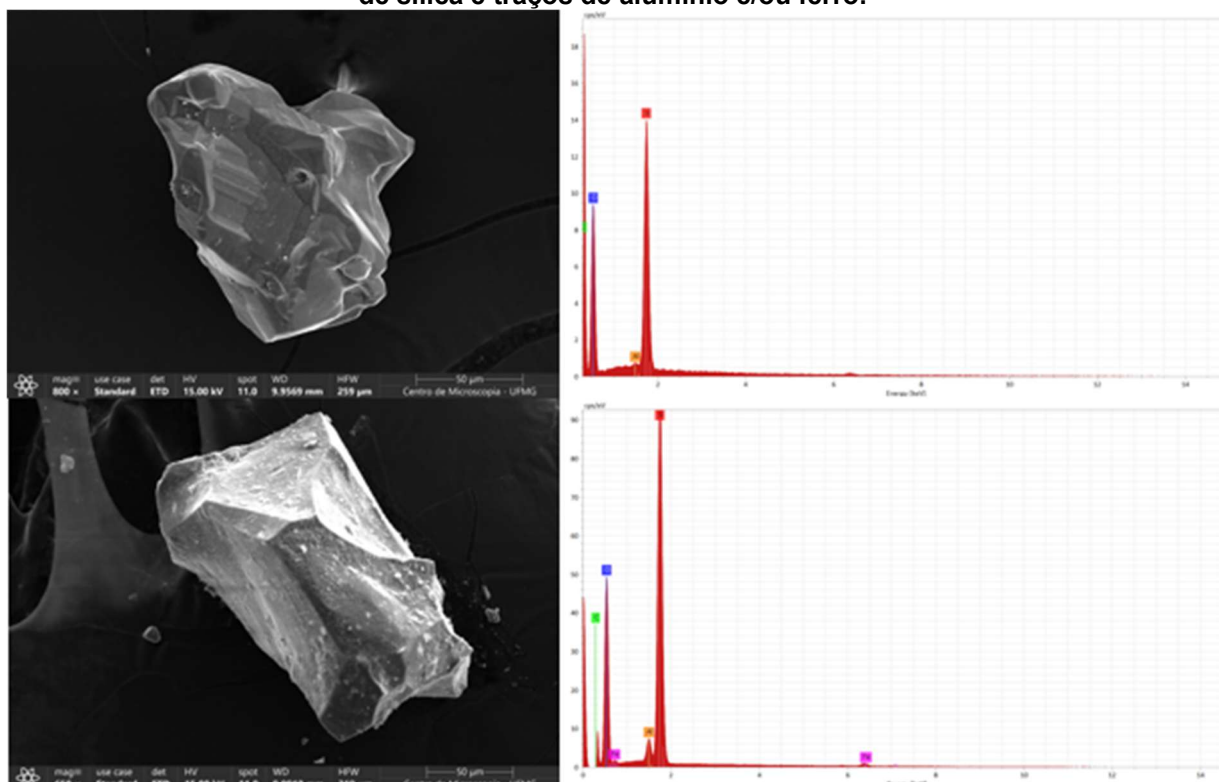


Figura 22 – Partículas do sedimento da PCH de Salto do Paraopeba com presença predominante de Si e com presença de mais marcante de Al e Fe e traços de outros minerais.

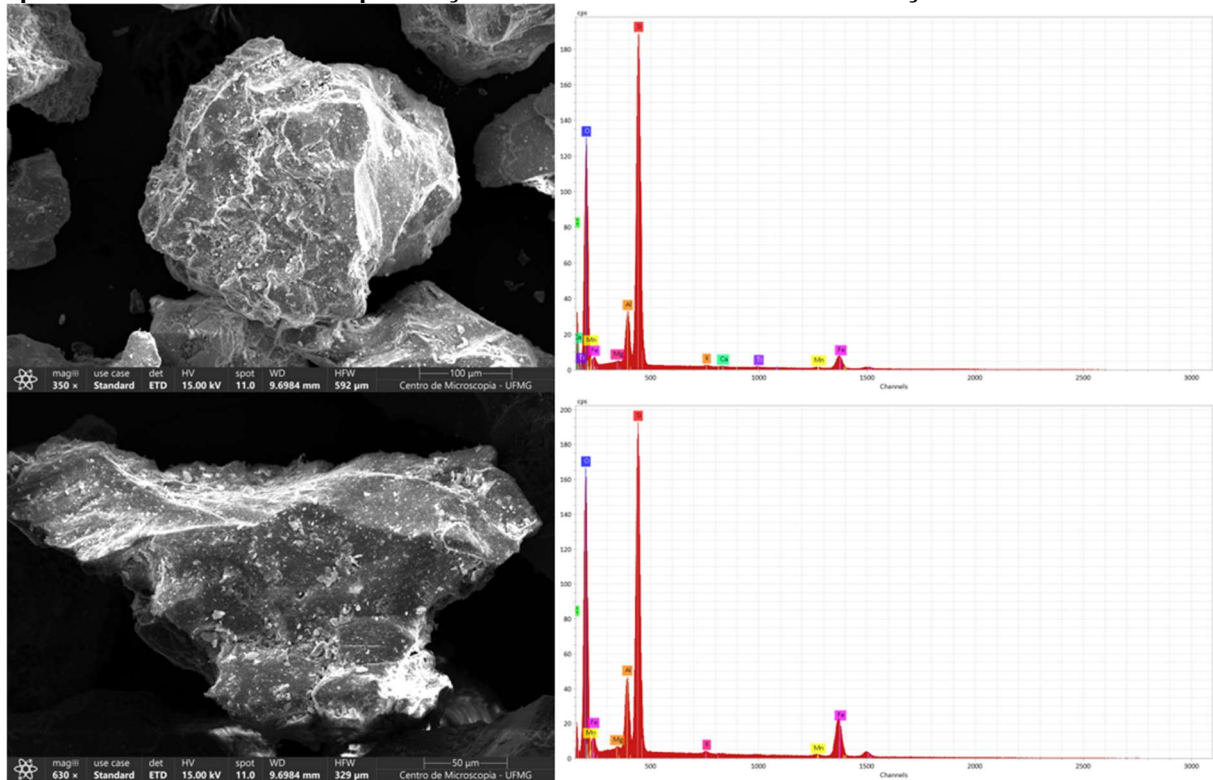
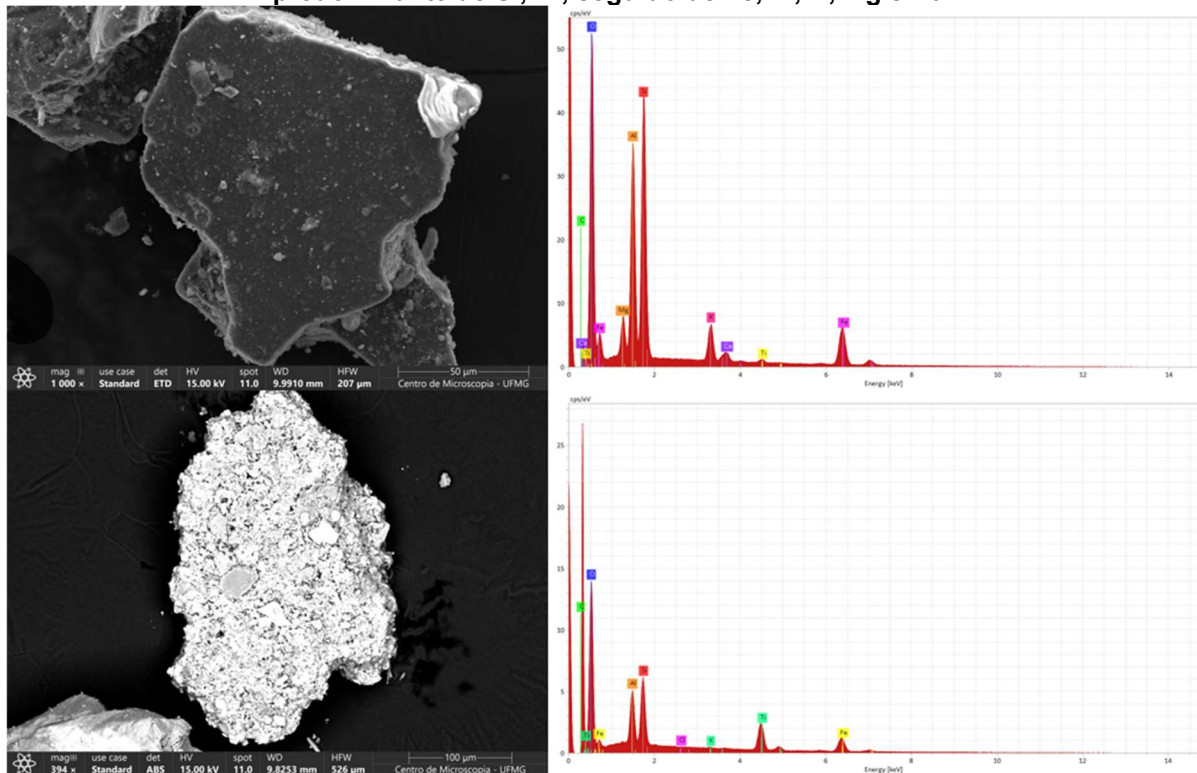


Figura 23 – Partículas do sedimento da PCH de Salto do Paraopeba com presença predominante de Si, Al, seguido de Fe, Ti, K, Mg e Ca.



5.1.3 Fator de forma e esfericidade das partículas

As imagens obtidas da análise de amostras através do Microscópio Eletrônico de Varredura FEI Quanta 200 FEG (Centro de Microscopia da UFMG) são apresentadas na Figura 25 a Figura 28 para o rejeito de minério de ferro e na Figura 24 para o sedimento da PCH de Salto do Paraopeba.

Figura 24 - Imagem de Microscópio de Varredura do sedimento da PCH de Salto do Paraopeba na faixa granulométrica 0,075 mm e 0,500 mm (65x).

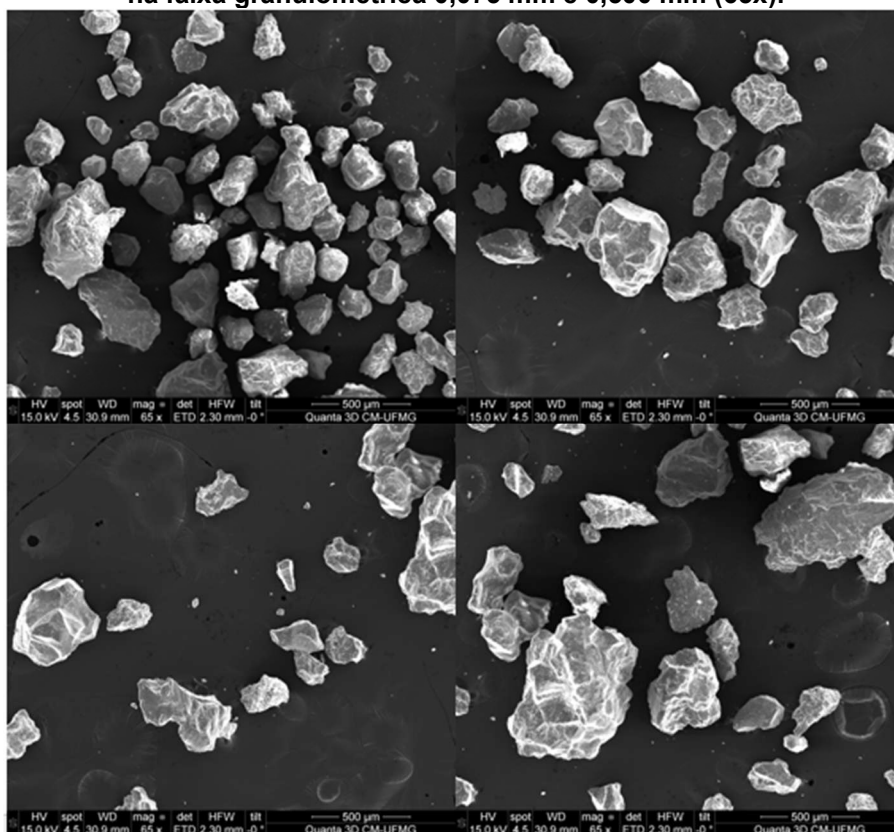


Figura 25 - Imagem de Microscópio de Varredura do Rejeito de minério de Ferro nas faixas granulométricas entre 0,300 mm e 0,500 mm (65x).

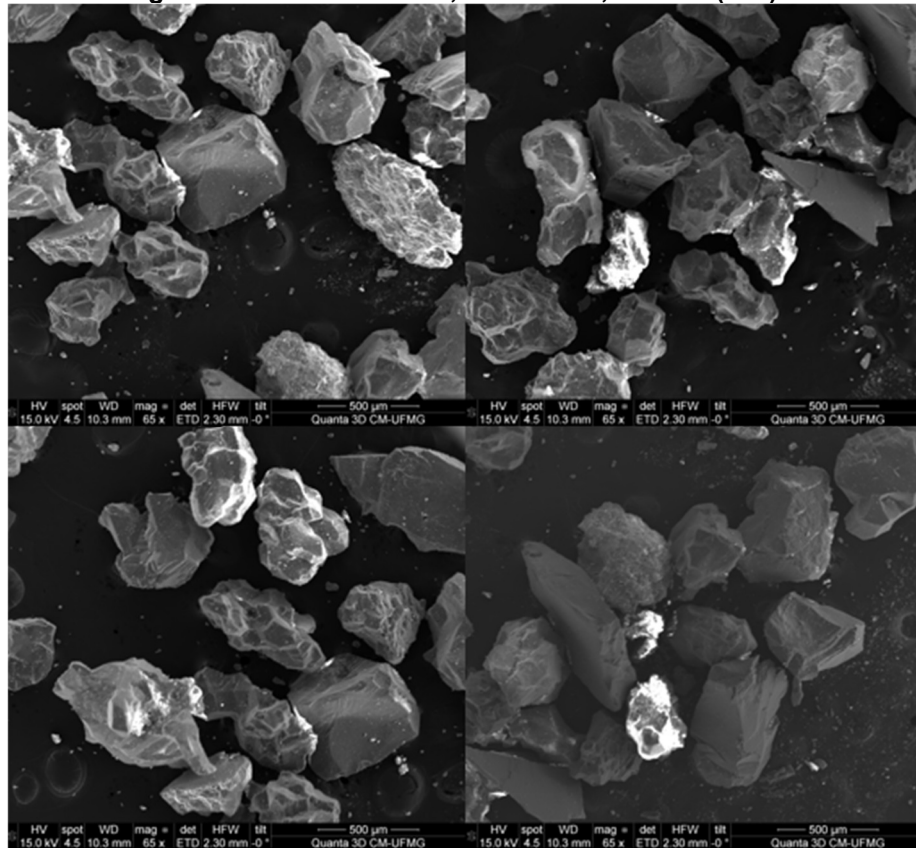


Figura 26 - Imagem de Microscópio de Varredura do Rejeito de minério de Ferro nas faixas granulométricas entre 0,150 mm e 0,300 mm (65x).

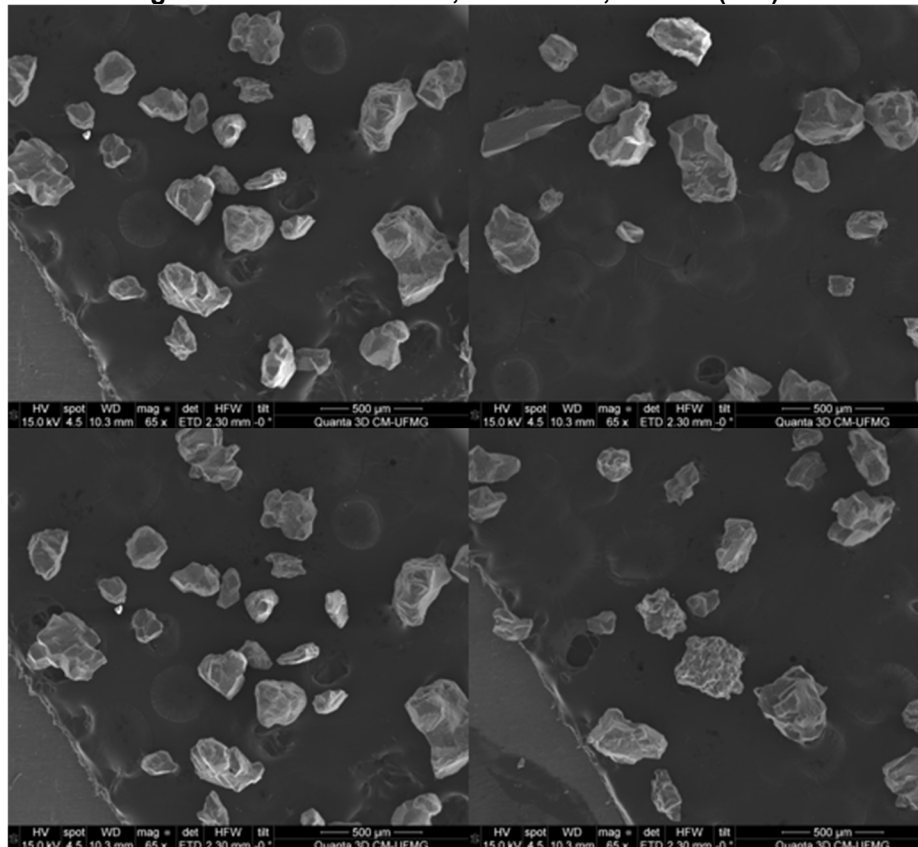


Figura 27 - Imagem de Microscópio de Varredura do Rejeito de minério de Ferro nas faixas granulométricas entre 0,063 mm e 0,150 mm (120x).

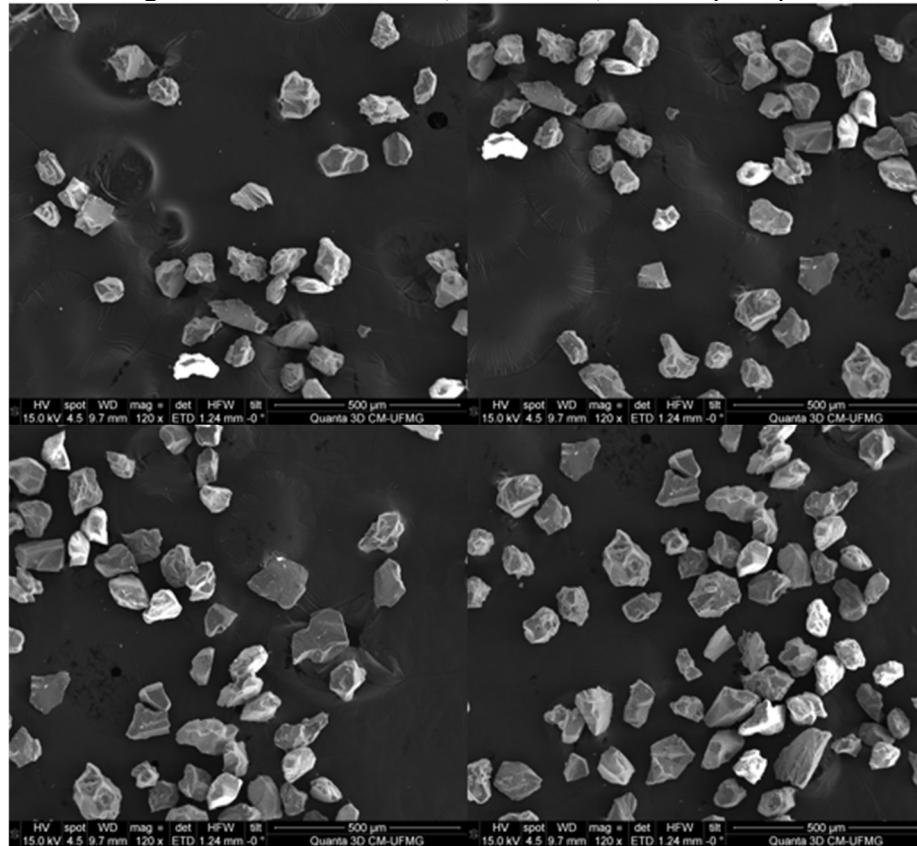
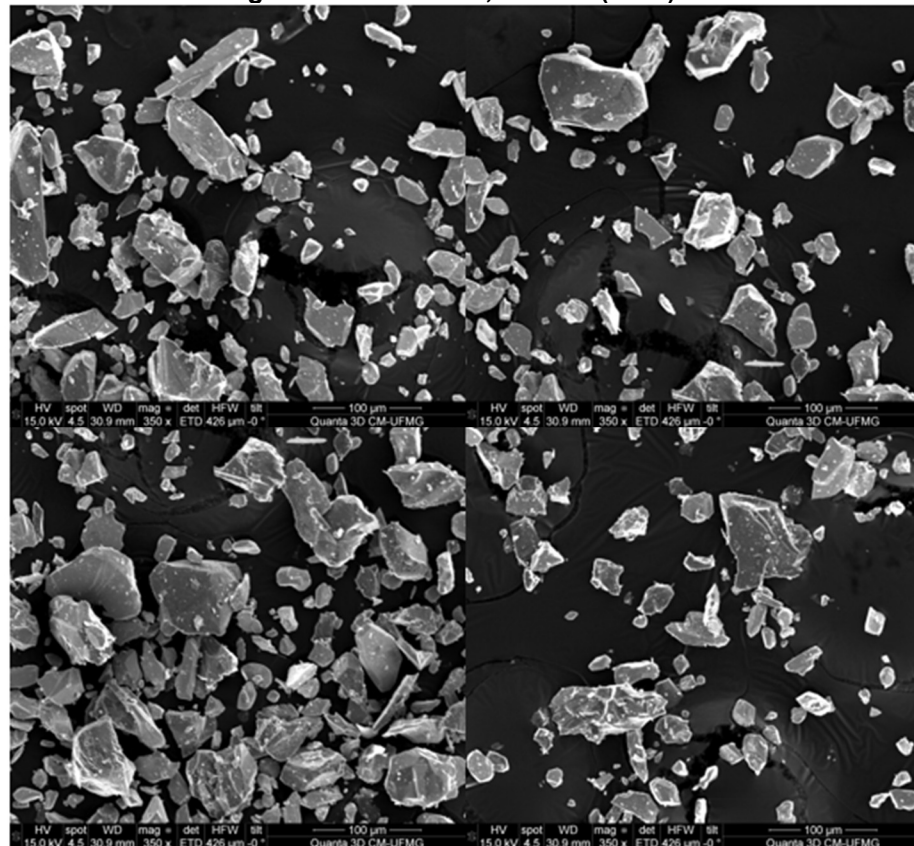


Figura 28 - Imagem de Microscópio de Varredura do Rejeito de minério de Ferro na faixa granulométrica < 0,063 mm (350x).



A partir das imagens foi estimado o fator de forma da partícula de Corey, conforme equação (16), e a esfericidade, conforme equação (17). Os eixos e raios das circunferências foram mensurados através do GstarCAD 2021 considerando as projeções do sedimento para caracterizar a área de projeção, a profundidade da partícula e circunferências circunscritas. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 12 e informações da partícula analisadas encontram-se no Apêndice A.

Tabela 12 - Fator de forma e esfericidade estimada para o rejeito de minério de ferro e sedimento da PCH de Salto do Paraopeba.

Amostra	Faixa granulométrica (mm)	Diâmetro médio (mm)	Número de partículas analisadas	Fator de forma (S_f)	Número de partículas analisadas	Esfericidade (P)
Rejeito de minério de ferro	<0,500 – 0,300>	0,400	25	$0,454 \pm 0,184$	10	$2,154 \pm 1,158$
	<0,300 – 0,125>	0,156	25	$0,436 \pm 0,177$	10	$2,338 \pm 0,900$
	<0,125 – 0,063>	0,094	25	$0,360 \pm 0,167$	10	$2,212 \pm 0,535$
	<0,063	-	25	$0,355 \pm 0,140$	10	$2,293 \pm 0,496$
Areia PCH-SP	<0,500 – 0,075>	0,288	25	$0,573 \pm 0,139$	10	$2,097 \pm 0,609$

Os resultados obtidos indicaram um fator de forma maior para o sedimento da PCH de Salto do Paraopeba, próximo a 0,58. No entanto, o valor encontrado é bastante inferior ao comumente relacionado a sedimentos naturais, próximo a 0,7 (DEY; ALI; PADHI, 2019). Provavelmente, a forma do sedimento pode estar relacionada ao fato do reservatório estar localizado na cabeceira do rio Paraopeba, indicando ainda menor lapidação e regularização do sedimento com os movimentos de rolamento ao longo do rio. Além disso, a presença de minérios como Ferro e Alumínio que configuram formas e texturas distintas da sílica, conforme ilustrado na Figura 23.

Para o rejeito de minério de ferro o fator de forma apresentou valores maiores, entre 0,42 e 0,44, para as partículas de areia média a fina, nas faixas granulométricas entre 0,500 mm e 0,300 mm e entre 0,300 mm e 0,125 mm. Para as areias muito finas e parcela de silte e argila, faixas granulométricas entre 0,125 mm e 0,063 mm e inferiores a 0,063 mm, o fator de forma ficou entre 0,35 e 0,36. As formas tabulares e laminares caracterizaram a presença de hematitas e caulinitas, respectivamente.

Referente ao arredondamento (P) das partículas selecionadas nas imagens do ensaio de microscopia, os valores obtidos ficaram entre 2,1 e 2,3, indicando que, em média,

as amostras analisadas são caracterizadas como partículas angulosas, conforme (FOLK, 1955), o que é possível ser observado através das imagens de microscopia por varredura. O valor é bastante inferior ao usualmente indicado para sedimento natural, 3,5 (USACE, 2022).

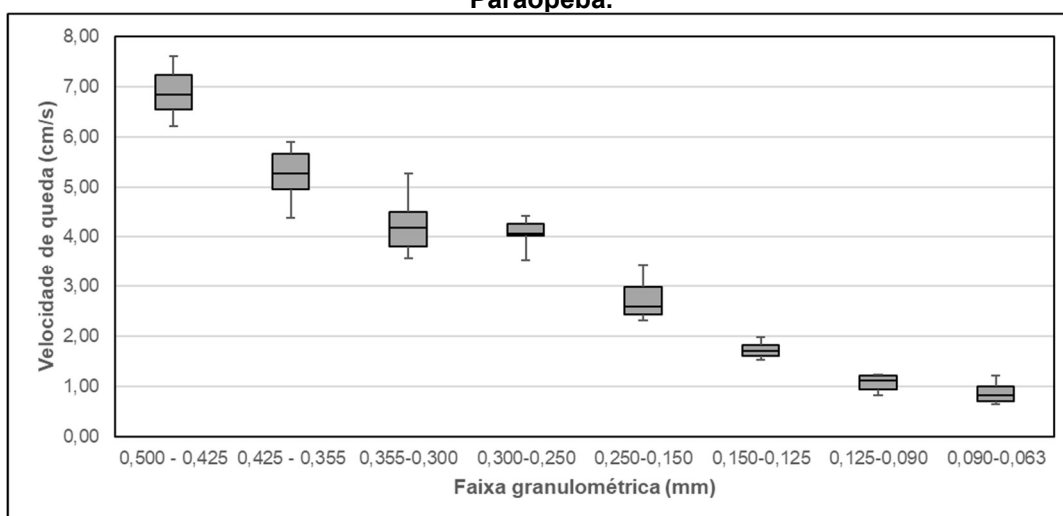
Os resultados apontam um alerta para a frequente simplificação de sedimentos naturais caracterizados como quartzo, com fator de forma igual a 0,7 e esfericidade próxima a 3,5, subarredondado, sendo que resultados de sedimentos coletados no fundo do reservatório de uma PCH, indicaram valores distintos.

O fator de forma é considerado de grande relevância na análise de velocidade de queda por condicionar movimentos da partícula de rotação e giro, aumentando a turbulência do fluido e formação de vórtices. A influência do fator de forma está relacionada à força de arrasto, que será maior quanto maior for a área superficial. Além disso, quando os principais eixos das partículas não forem proporcionais, exatamente como observado para diversas partículas do rejeito de minério de ferro, as resultantes de forças de arrasto e peso podem levar ao movimento de rotação.

5.2 Velocidade de queda da partícula

Os resultados obtidos de velocidade de queda para o sedimento coletado no reservatório da PCH de Salto do Paraopeba é apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Velocidade de queda obtida para sedimento do reservatório da PCH de Salto do Paraopeba.

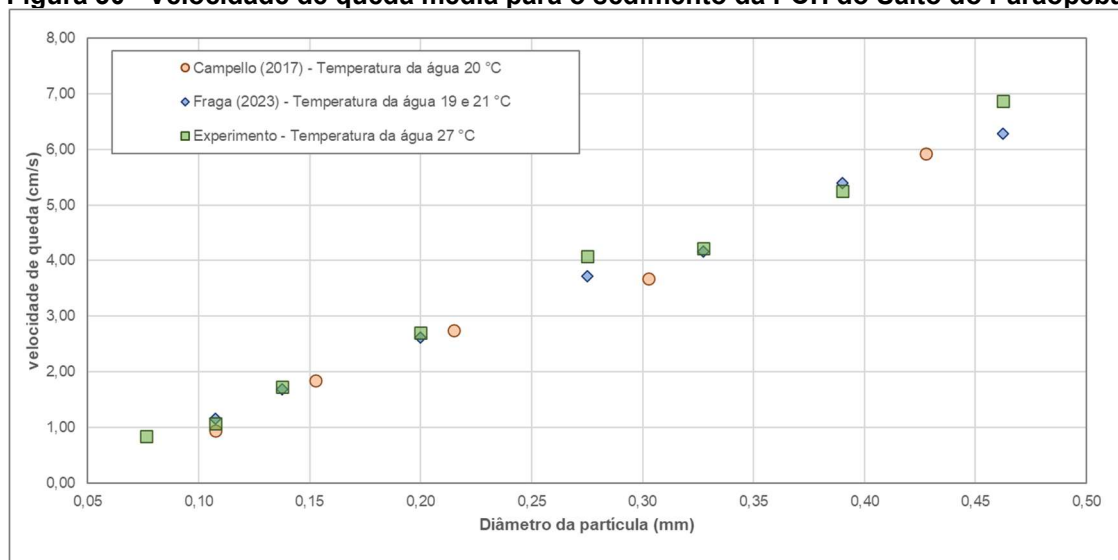


Conforme esperado, a velocidade de queda aumenta à medida que o tamanho do grão aumenta. Para a faixa granulométrica de grãos entre 0,500 mm e 0,425 mm, a velocidade de queda média é de 6,9 cm/s, enquanto na faixa de 0,090 mm e 0,063 mm, a velocidade média é de apenas 0,8 cm/s. Além disso, observou-se maior dispersão de resultados para os grãos maiores em comparação com as faixas granulométricas entre 0,150 mm e 0,063 mm.

O resultado para a faixa entre 0,300 mm e 0,250 mm apresentou valores médios bastante similares aos obtidos para a faixa entre 0,355 mm e 0,300 mm. Sendo recomendado refazer o experimento ou desconsiderar o valor obtido para a faixa de 0,300 mm e 0,250 mm.

A avaliação do experimento contou com a comparação dos resultados de velocidade de queda do sedimento da PCH do Salto do Paraopeba obtidos por outros autores (CAMPELLO, 2017; FRAGA, 2023), conforme Figura 30.

Figura 30 - Velocidade de queda média para o sedimento da PCH do Salto do Paraopeba.



Os resultados indicaram valores bastante similares, de forma geral, assim validando os métodos aplicados na pesquisa. Pequenas diferenças observadas podem ser relacionadas às diferenças de temperatura da água. A elevada temperatura da água (27°C) marcada pode ter sido ocasionada pela onda de calor presente no final de fevereiro de 2024, quando da realização do experimento.

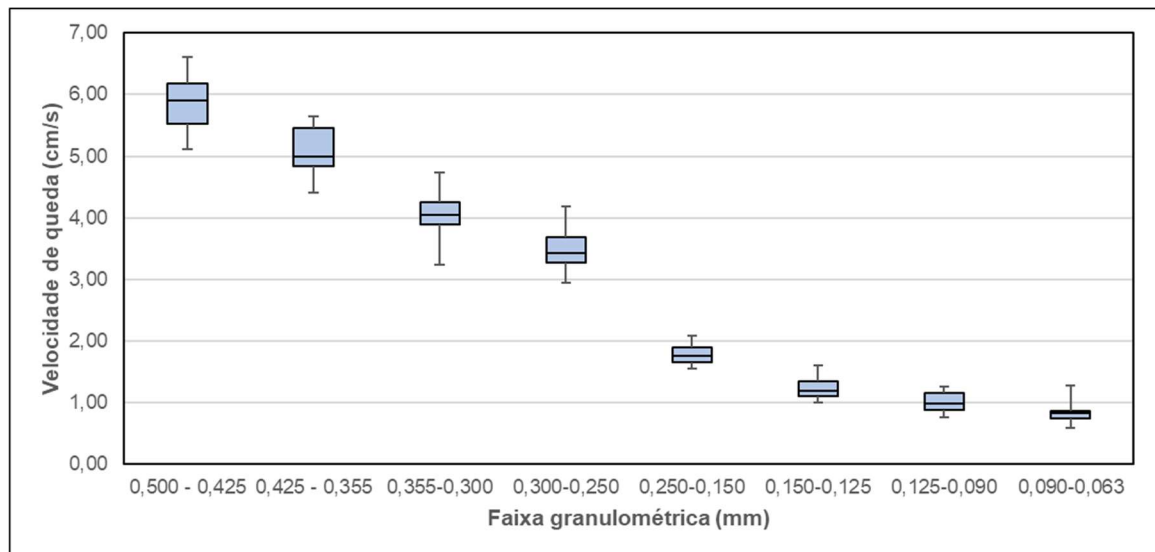
Os resultados obtidos de velocidade de queda para a parcela arenosa do rejeito de minério de ferro filtrado é apresentado na Figura 31. Quando comparadas as mesmas faixas granulométricas observa-se que o rejeito apresentou velocidade de queda inferior à da areia, sendo a diferença menos proeminente para as partículas mais finas.

Parte da explicação pode estar relacionada ao valor de massa específica mais elevado para o sedimento da PCH. A parcela do rejeito mais arenoso, aproximadamente $2,700 \text{ g/cm}^3$ apresenta massa específica muito próxima do quartzo, com presença majoritária de sílica. Já o sedimento de Salto do Paraopeba apresentou massa específica de $2,870 \text{ g/cm}^3$, pela presença de alumínio e ferro na amostra.

Além disso, alguns fatores relativos ao movimento de rotação das partículas de rejeito, movimento mais perceptível nas análises de vídeo do experimento do rejeito em comparação aos vídeos do sedimento da PCH. Provavelmente isso ocorre devido à forma mais angulosa do grão do rejeito, relacionado ao intenso processo de cominuição.

Outro fator está relacionado a temperatura da água que se encontra com valor superior nos ensaios da areia (27°C) em comparação com a temperatura nos ensaios do rejeito (entre 22°C e 24°C), reduzindo a viscosidade do fluido. O efeito da temperatura é bastante relevante, conforme discutido por Palu e Julien (2019). Segundo os autores, uma análise hipotética de redução da temperatura da água para 5°C , cerca de 24°C mais fria do que a temperatura média medida no rio Doce, a carga de rejeito transportada entre a Barragem de fundão até a região costeira do Brasil, cerca de 670 km, seria quase 12 vezes maior do que o valor observado (1500 mg/L). Dessa forma, a análise da temperatura da água, relacionada à localização da área de estudo, assim como, a profundidade do escoamento em análise, tem impacto direto na velocidade de queda e no processo de transporte e deposição de sedimentos.

Figura 31 - Velocidade de queda obtida para a areia e rejeito de minério de ferro (cm/s).



As partículas maiores, entre 0,500 mm e 0,425 mm, apresentam as maiores velocidades de queda, com valor médio de 5,9 cm/s. Para partículas menores, a velocidade de queda reduz, chegando a 0,8 cm/s no caso de partículas entre 0,090 mm e 0,063 mm. Observa-se também que a dispersão dos resultados obtidos na velocidade de queda do rejeito de minério de ferro é maior para as partículas menores.

Para a avaliação do desempenho dos resultados experimentais foram realizados os cálculos do coeficiente de eficiência (NSE).

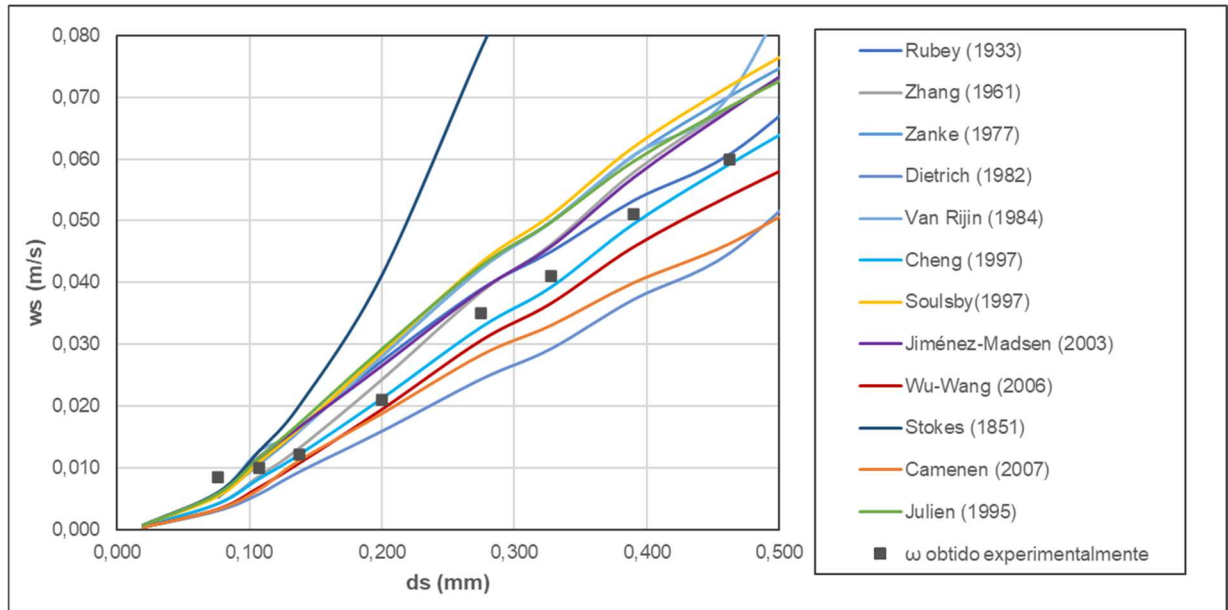
A comparação dos dados obtidos para a estimativa da velocidade de queda realizada pelos autores indicados na Tabela 1 e na Tabela 3 com os valores médios da análise experimental é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 - Comparação dos resultados obtidos para o sedimento da PCH de Salto do Paraopeba e para o Rejeito de minério de ferro.

Amostra	Faixa granulométrica	T (°C)	$\bar{\omega}_s$ (cm/s)	Stokes (1851)	Rubey (1933)	Zhang (1961)	Zanke (1977)	Dietrich (1982)	Van Rijn (1984)	Cheng (1997)	Soulsby (1997)	Jiménez-Madsen (2003)	Wu-Wang (2006)	Julien (1995)	Camenen (2007)
Rejeito de Minério de Ferro filtrado	0,500-0,425	25	6,00	22,01	6,08	6,83	7,03	4,48	7,03	5,92	7,18	6,79	5,41	6,85	4,63
	0,425-0,355	25	5,10	15,65	5,33	5,78	6,06	3,73	6,06	4,95	6,19	5,70	4,58	5,96	4,00
	0,355-0,300	22	4,10	10,24	4,50	4,61	4,99	2,93	4,99	3,92	5,08	4,58	3,66	4,97	3,31
	0,300-0,250	25	3,50	7,78	3,89	3,84	4,24	2,44	4,24	3,28	4,32	3,88	3,07	4,27	2,83
	0,250-0,125	25	2,10	4,12	2,73	2,42	2,82	1,60	2,82	2,12	2,86	2,65	1,95	2,92	1,88
	0,150-0,125	25	1,22	2,00	1,65	1,31	1,60	0,94	1,60	1,21	1,62	1,65	1,08	1,72	1,12
	0,125-0,090	27	1,00	1,27	1,14	0,86	1,07	0,58	1,27	0,82	1,09	1,17	0,69	1,17	0,65
	0,090-0,063	24	0,84	0,60	0,58	0,42	0,53	0,31	0,60	0,42	0,54	0,59	0,34	0,58	0,33
	RMSE			7,32	0,36	0,48	0,71	0,97	0,72	0,20	0,80	0,49	0,42	0,69	0,76
	NASH			-14,56	0,96	0,93	0,85	0,73	0,85	0,99	0,82	0,93	0,95	0,86	0,83
Sedimento do reservatório da PCH de Salto do Paraopeba	0,500-0,425	27	6,97	25,56	6,52	7,40	7,57	5,32	7,57	6,45	7,74	7,40	6,31	7,36	5,90
	0,425-0,355	27	5,36	18,18	5,74	6,31	6,57	4,46	6,57	5,42	6,71	6,23	5,34	6,43	5,10
	0,355-0,300	27	4,30	12,82	4,97	5,25	5,59	3,65	5,59	4,47	5,70	5,18	4,42	5,53	4,33
	0,300-0,250	27	3,80	9,04	4,24	4,27	4,66	2,95	4,66	3,63	4,75	4,27	3,59	4,67	3,62
	0,250-0,125	27	2,71	4,78	3,02	2,74	3,15	1,93	3,15	2,38	3,20	2,93	2,32	3,25	2,50
	0,150-0,125	27	1,73	2,26	1,82	1,47	1,78	1,12	1,78	1,34	1,81	1,81	1,28	1,90	1,48
	0,125-0,090	27	1,08	1,38	1,22	0,93	1,16	0,76	1,38	0,89	1,18	1,26	0,82	1,26	1,00
	0,090-0,063	27	0,85	0,70	0,67	0,48	0,61	0,44	0,70	0,48	0,62	0,69	0,44	0,67	0,55
	RMSE			8,77	0,38	0,55	0,75	0,86	0,75	0,31	0,84	0,51	0,37	0,70	0,42
	NASH			-17,80	0,96	0,93	0,86	0,82	0,86	0,98	0,83	0,94	0,97	0,88	0,96

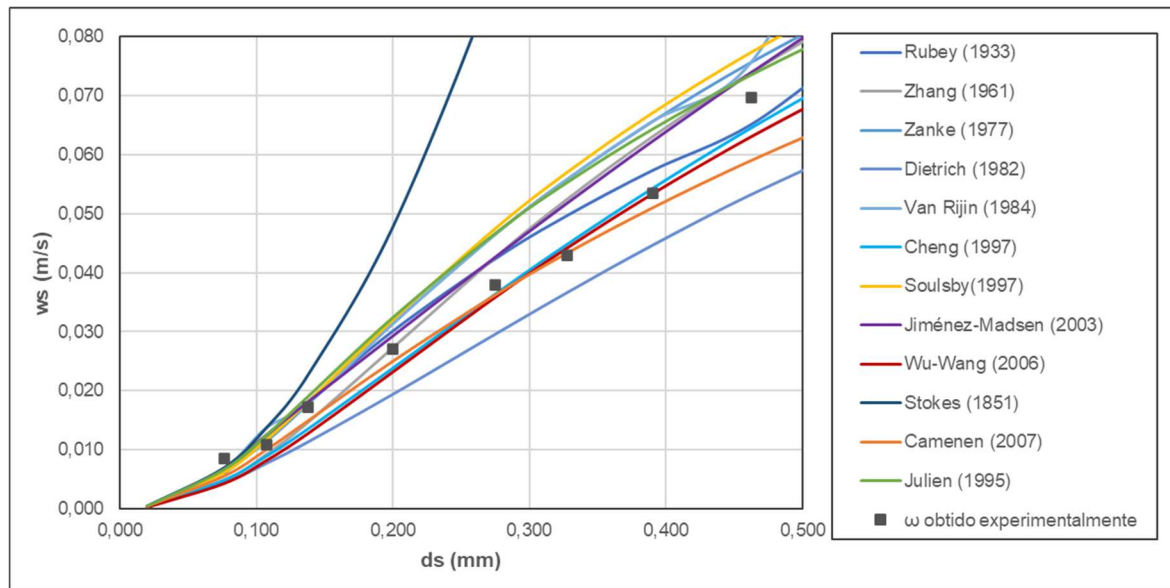
A Figura 32 apresenta os resultados da comparação das equações encontradas na literatura com os valores apurados experimentalmente para a velocidade de queda do rejeito de minério de ferro. Para cada faixa granulométrica foram ajustados os valores de viscosidade da água segundo a temperatura da mesma medida na coluna de sedimentação.

Figura 32 - Comparação dos resultados obtidos para o Rejeito de minério de ferro.



A Figura 33 apresenta os resultados da comparação das equações encontradas na literatura com os valores apurados experimentalmente para a velocidade de queda para o sedimento da PCH de Salto do Paraopeba. Todas as faixas granulométricas foram obtidas para a mesma temperatura da água.

Figura 33 - Comparação dos resultados obtidos para o sedimento da PCH de Salto do Paraopeba.



Para a areia e para o rejeito de minério de ferro, a melhor correlação, com menor valor de RMSE e coeficiente de NSE próximo a unidade, foi observada através da equação desenvolvida por Cheng (2008). Destaca-se que a aplicação desta equação é bastante simples e não considera o fator de forma e esfericidade da partícula. Outros autores como Rubey (1933), Jiménez e Madsen (2004) e Wu e Wang (2006) também apresentaram valores satisfatórios.

Para o sedimento de Salto do Paraopeba, os resultados de Camenen (2007) indicaram boa aderência. Como esperado, a equação de Stokes (1851) indicou menor capacidade de predição, tendo sido desenvolvida para partículas esféricas e ser representativa apenas para Reynolds da partícula inferior a 1,0. Portanto, para partículas irregulares e de diâmetros superiores a 1,0 mm ($R_p > 1,0$), a equação não é válida já que desconsidera os termos de inércia para a resolução analítica da velocidade de queda (DEY, *et al.*, 2019).

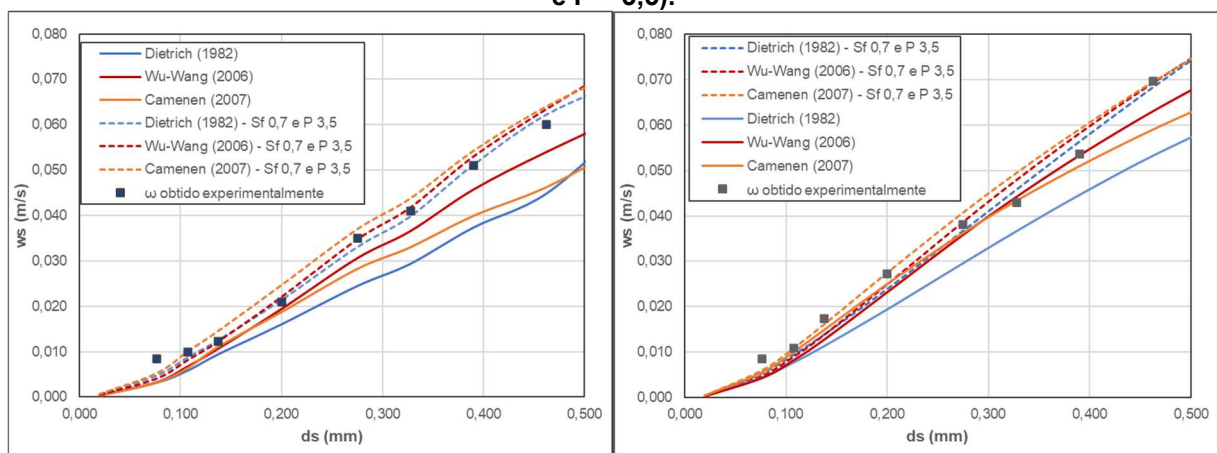
A segunda menor capacidade de predição foi Dietrich (1982), com valores de RMSE de 0,72 para o rejeito e 1,18 para o sedimento de Salto do Paraopeba, e Nash de 0,85 e 0,66, respectivamente. Observa-se que as equações desenvolvidas por Jiménez e Madsen (2004), Julien (2010), Rubey (1933), Soulsby (1997), Stokes (1851), Van Rijn (1984a), Zhang (1961), tendem a subestimar os resultados, enquanto as equações de

Camenen (2007), Dietrich (1982) e Wu e Wang (2006) superestimaram em quase todas as faixas granulométricas.

Para a faixa granulométrica mais fina, entre 0,063 mm e 0,090 mm, todas as equações subestimaram a velocidade de queda. Possivelmente, em função das dificuldades de obtenção de resultados para as partículas menores, que apresentam pouca alteração de posição vertical entre um quadro e outro.

As equações que consideram o fator de forma e o arredondamento da partícula (CAMENEN, 2007; DIETRICH, 1982; WU; WANG, 2006) também foram avaliadas considerando os valores padrões de sedimentos naturais ($S_f = 0,7$ e $P = 3,5$). Os resultados estão apresentados na Figura 34.

Figura 34 – Resultado da comparação das equações de velocidade de queda que consideram os parâmetros de fator de forma e a redondeza da partícula estimados e padronizados ($S_f = 0,7$ e $P = 3,5$).



Como é possível observar, as equações tiveram melhor aderência quando considerados os valores usuais de sedimentos naturais (areias) do que quando comparados aos resultados obtidos com a variação do fator de forma e arredondamento, estimados através do ensaio de microscopia. Conforme mencionado, foram observados movimentos de rotação da partícula indicando a importante influência da forma da partícula. No entanto, possivelmente as equações indicadas não abrangeram diferenças de de fator de forma e arredondamento da partícula na amplitude obtida para as partículas ensaiadas.

Outro fator observado foi a melhor aderência dos resultados de velocidade de queda quando incorporados às variações de viscosidade cinemática da água segundo a

temperatura registrada no experimento. Tal variação indica a importância de avaliar as condições de temperatura e possíveis variações sazonais nas condições de estudo de transporte de sedimentos.

5.3 Velocidade de queda para diferentes concentrações das frações finas

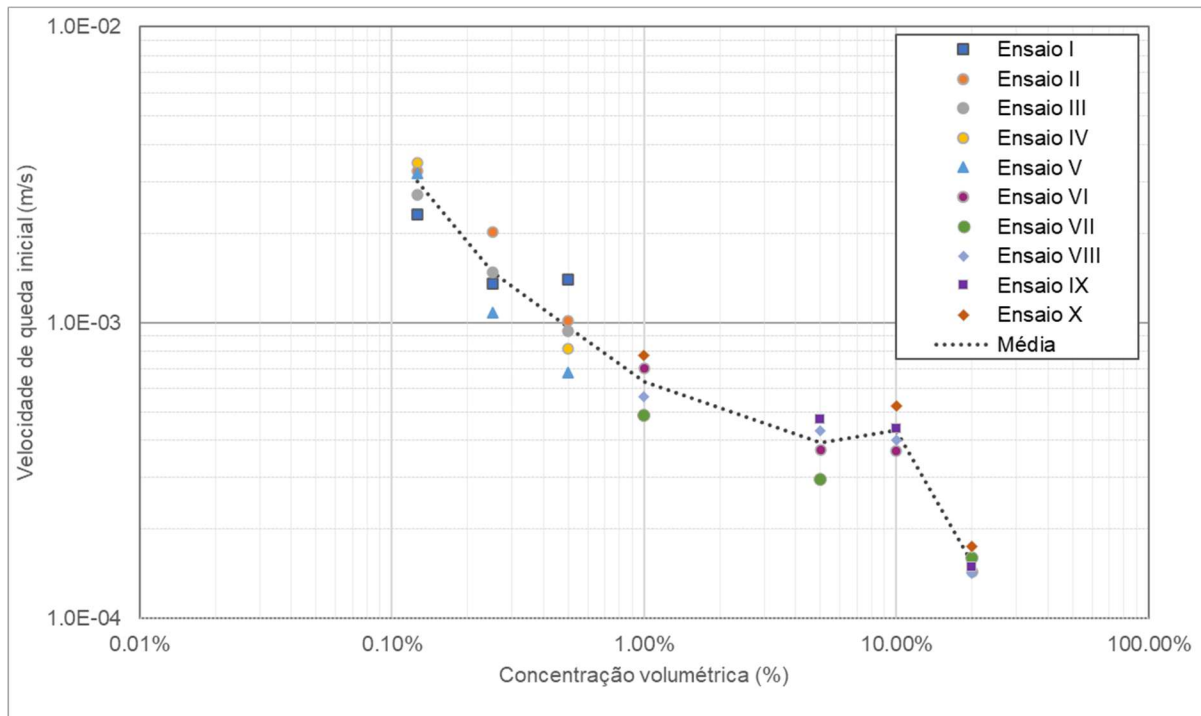
O ensaio de provetas foi desenvolvido com o intuito de obter a relação de velocidade de queda e concentração do rejeito de minério de ferro. Considerando a obtenção de resultados unicamente com análise de imagens, foram estabelecidos dois momentos marcantes do ensaio: a mudança de tonalidade da coloração preta/cinzenta para amarronzada e o momento de clarificação completa da amostra. Tendo sido possível identificar outras mudanças de tonalidades ao longo dos ensaios, principalmente entre as concentrações volumétricas acima de 0,5%. No entanto, além da abordagem se tornar mais subjetiva, ainda restam dúvidas da representatividade dos resultados.

Destaca-se que não foi possível avaliar a velocidade de queda do rejeito nos ensaios realizados com a concentração volumétrica de 0,01%, mesmo após tratamento das imagens obtidas. Provavelmente, para esta concentração a velocidade de queda se aproxima da velocidade terminal de um grão de rejeito, devido à baixa interação entre as partículas. Assim, para a obtenção de resultados para esta concentração, seria necessário a utilização de uma câmera com melhor resolução. Os resultados de velocidade de queda por concentração para a parcela acinzentada do rejeito de minério de ferro são apresentados na Tabela 14 e na Figura 35.

Tabela 14 - Resultados obtidos para a variação da velocidade de queda (m/s) com a concentração volumétrica (%) da parcela acinzentada do rejeito.

Cv (%)	0.05%	0.13%	0.3%	0.5%	1.0%	5.0%	11.0%	25.0%
Ensaio I	-	2.33E-03	1.36E-03	1.40E-03	-	-	-	-
Ensaio II	-	3.27E-03	2.02E-03	1.01E-03	-	-	-	-
Ensaio III	-	2.70E-03	1.48E-03	9.39E-04	-	-	-	-
Ensaio IV	-	3.47E-03	-	8.13E-04	-	-	-	-
Ensaio V	-	3.21E-03	1.08E-03	6.77E-04	-	-	-	-
Ensaio VI	-	-	-	-	7.02E-04	3.71E-04	3.69E-04	1.43E-04
Ensaio VII	-	-	-	-	4.87E-04	2.96E-04	-	1.60E-04
Ensaio VIII	-	-	-	-	5.63E-04	4.33E-04	4.00E-04	1.41E-04
Ensaio IX	-	-	-	-	-	4.71E-04	4.38E-04	1.49E-04
Ensaio X	-	-	-	-	7.76E-04	-	5.22E-04	1.75E-04
Média	-	3.0E-03	1.5E-03	9.7E-04	6.3E-04	3.9E-04	4.3E-04	1.5E-04
Desvio Padrão	-	4.7E-04	3.9E-04	2.7E-04	1.3E-04	7.7E-05	6.6E-05	1.4E-05

Figura 35 - Resultados obtidos da variação da velocidade de queda com a concentração volumétrica da parcela acinzentada do rejeito.



Os resultados para a velocidade de queda da parcela acinzentada de rejeito foram obtidos entre os primeiros 5 minutos de ensaio. Observa-se uma clara tendência de diminuição da velocidade de queda inicial com o aumento da concentração volumétrica do rejeito. Em baixas concentrações (0,01%), a velocidade é da ordem de 10^{-3} m/s, enquanto em altas concentrações (25%), a velocidade cai para cerca de 10^{-4} m/s. Essa relação inversa pode ser explicada pelo aumento da interação entre as partículas em concentrações mais elevadas, caracterizando a velocidade de queda confinada (*hindred*). Conforme Wan *et al.* (2015) e Dey *et al.* (2019) a maior interferência entre as partículas causa maior resistência do fluido, e com formação de flocos distintos que podem aumentar o tamanho e diminuição da densidade. Além disso, em concentrações mais altas, a viscosidade aparente da suspensão aumenta, o que também contribui para a diminuição da velocidade de queda.

Apesar da tendência geral de diminuição da velocidade com o aumento da concentração, somente entre as concentrações de 5% e 11% essa tendência é alterada. O valor médio da velocidade de queda é ligeiramente superior para a concentração volumétrica de 11%. Além disso, a dispersão dos dados em cada concentração também indica que outros fatores além da concentração volumétrica,

como o tamanho, forma das partículas e composição mineralógica também influenciam a velocidade de queda.

Tratando-se da parcela acinzentada em análise, representa a parcela de hematita (ferro), cerca de 40% da amostra, os resultados podem evidenciar variabilidade quanto a composição da amostra de rejeito utilizada no ensaio.

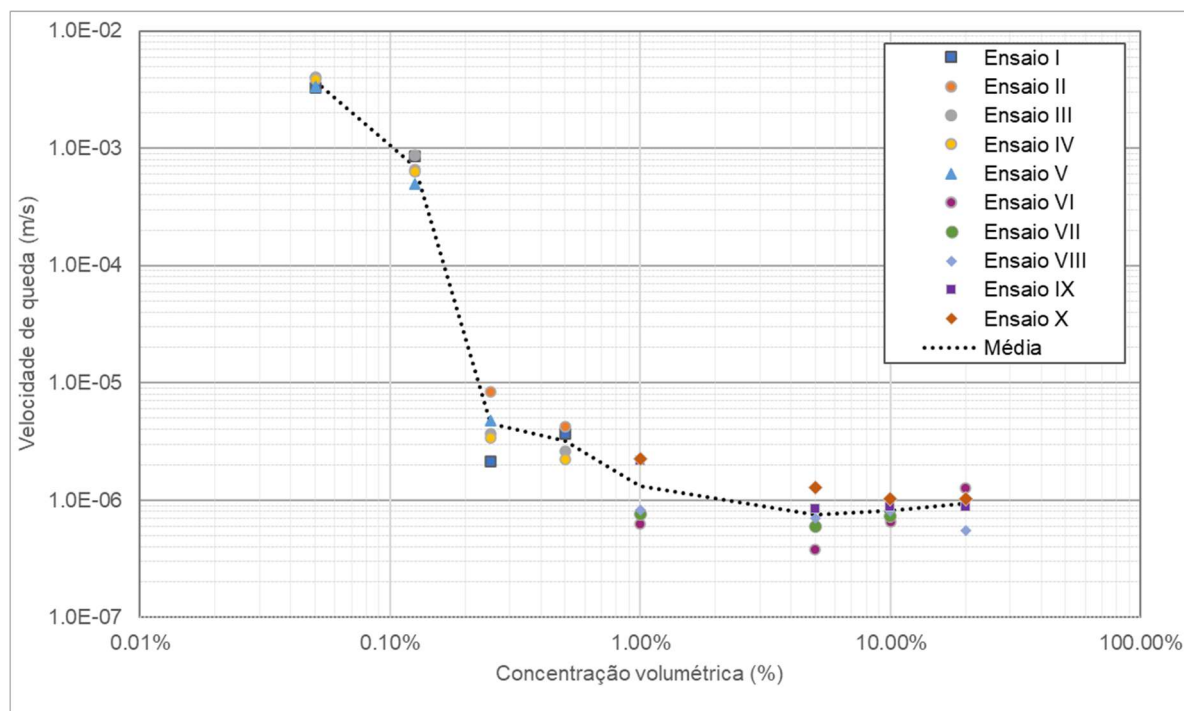
Resultados mais precisos seriam obtidos através de um decantador com saídas para coleta da mistura em diferentes alturas, conforme Wan *et al.*, (2015) e You (2004). A coleta de amostra permitiria avaliar a variação da velocidade de queda por concentração em vários momentos de um mesmo ensaio e também permitiria caracterizar as amostras coletadas de modo a diferenciar as partículas com maior e menor velocidade de queda.

A segunda relação de velocidade de queda e concentração foi obtida a partir da clarificação total das amostras. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 15 e Figura 36.

Tabela 15 - Resultados obtidos da variação da velocidade de queda com a concentração volumétrica de rejeito até a clarificação total da mistura.

Cv (%)	0.05%	0.13%	0.3%	0.5%	1.0%	5.0%	11.0%	25.0%
Ensaio I	3.27E-03	8.59E-04	2.13E-06	3.70E-06	-	-	-	-
Ensaio II	4.05E-03	6.59E-04	8.39E-06	4.21E-06	-	-	-	-
Ensaio III	4.05E-03	8.67E-04	3.67E-06	2.59E-06	-	-	-	-
Ensaio IV	3.86E-03	6.38E-04	3.40E-06	2.22E-06	-	-	-	-
Ensaio V	3.33E-03	4.94E-04	4.80E-06	-	-	-	-	-
Ensaio VI	-	-	-	-	6.31E-07	3.80E-07	6.48E-07	1.27E-06
Ensaio VII	-	-	-	-	7.54E-07	5.99E-07	7.35E-07	-
Ensaio VIII	-	-	-	-	8.25E-07	6.96E-07	8.02E-07	5.47E-07
Ensaio IX	-	-	-	-	2.17E-06	8.38E-07	8.68E-07	8.74E-07
Ensaio X	-	-	-	-	2.24E-06	1.27E-06	1.02E-06	1.03E-06
Média	3.7E-03	7.0E-04	4.5E-06	3.2E-06	1.3E-06	7.6E-07	8.1E-07	9.3E-07
Desvio Padrão	3.8E-04	1.6E-04	2.4E-06	9.3E-07	8.1E-07	3.3E-07	1.4E-07	3.0E-07

Figura 36 - Resultados obtidos da variação da velocidade de queda (m/s) com a concentração volumétrica (%) da parcela acinzentada do rejeito



A avaliação de clarificação total das amostras necessitou de um intervalo bastante variado entre as concentrações. Para as amostras com 0,05% de rejeito, bastou menos de um minuto para clarificação total, e para as amostras de 0,13% o tempo necessário variou entre três e seis minutos. Já para as amostras de 0,25% e 0,5% as clarificações foram observadas nos intervalos de 9 a 14 horas, e entre 10 e 20 horas, respectivamente. Para as concentrações entre 1,0% e 25%, foram necessários dois a oito dias para a clarificação completa das amostras.

Verificou-se ainda que algumas amostras continham particulados que garantiam uma tonalidade alaranjada clara que, mesmo após dias de ensaio, não indicaram mudança significativa de tom. Para estas, os resultados foram considerados até atingir a coloração indicada. Tal ocorrência foi observada para concentrações de 0,5%, 1,0%, 5% e 10%, indicando não haver correlação direta com a concentração, o que pode ser explicado pela presença de um percentual maior de uma parcela extremamente fina do rejeito para as amostras que praticamente se solubilizam com a água. Novamente, a coleta de amostras ao longo do experimento permitiria avaliar com maior clareza qual concentração e tipo de material comporia a mistura citada.

Destaca-se que para a concentração de 0,13% não houve uma diferença tão elevada entre a velocidade de queda da parcela acinzentada e da velocidade de queda que considera a clarificação total da mistura, com redução do valor médio de 3×10^{-3} m/s para 7×10^{-4} m/s. A partir de 0,25% de concentração volumétrica, cerca de 10 g/L, foram observados valores de velocidade de queda entre 10^{-6} m/s e 10^{-7} m/s, uma redução de velocidade de queda com relação a concentração um pouco menos evidente, em comparação com concentrações menores.

Para avaliar a relação da velocidade de queda com a concentração, os resultados obtidos foram comparados com as equações selecionadas e apresentadas na Tabela 4. Conforme mencionado, somente Hwang (1989) indicou a clara separação entre as três fases de velocidade de queda: fase acelerada, fase de máxima floculação e fase confinada desacelerada (*hindred*). Autores como Richardson e Zaki (1954), Sha (1965), Oliver (1961), Soulsby (1997), Garside e Al-Dibouni (1977) e Cheng (1997) definiram equações apenas para a fase confinada, indicando uma redução mais significativa da velocidade de queda a partir de concentrações volumétricas superiores a 1,0% (aproximadamente 40 g/L).

Considerando que os métodos utilizados não permitiram a obtenção da velocidade de queda da partícula do material fino, foi considerado o valor obtido a partir da equação de Stokes (1851), já que é considerada válida para o Reynolds da partícula inferior a 1,0. Outra incerteza refere-se ao diâmetro médio da partícula, pois a amostra é composta pelo material passante da peneira 0,063 mm. Com isso, o diâmetro da partícula e demais parâmetros adotados para estimativa da velocidade de queda para as equações selecionadas na Tabela 4 são apresentados na Tabela 16. Adicionalmente, os valores de densidade e viscosidade cinemática da água considerados para a temperatura de 25°C foram corrigidos, considerando a concentração da mistura (JULIEN, 2010).

Tabela 16 – Parâmetros utilizados nas equações selecionadas para estimativa da velocidade de queda (ω_c).

Parâmetro	Intervalo		Adotado	
	mínimo	máximo	Clarificação total	Parcela acinzentada
d_s (mm)	0	0,063	0,001	0,02
ω_s (m/s) ¹	-	-	$1,8 \times 10^{-6}$	$7,4 \times 10^{-4}$
C_1 (g/L)	0,1	0,3	0,60	2,00

Parâmetro	Intervalo		Adotado	
	mínimo	máximo	Clarificação total	Parcela acinzentada
C ₂ (g/L)	0,3	4	5,00	1,00
C ₃ (g/L)	5	75	20	75
m	1	2,8	2,70	2,02
n	0,4	2,8	2,00	2,75
a (m/s)	0,01	0,23	0,10	0,06
b (g/L)	1,3	25	1,00	3,90

¹ Velocidade de queda da partícula estimada a partir da equação de Stokes (1851).

Os valores do diâmetro da partícula, assim como os coeficientes da equação de Hwang (1989) foram adotados para atingir melhor aderência aos valores medidos. Dessa forma, naturalmente o diâmetro considerado para a parcela acinzentada (0,02 mm) é superior ao diâmetro médio para a clarificação total da amostra (0,001 mm).

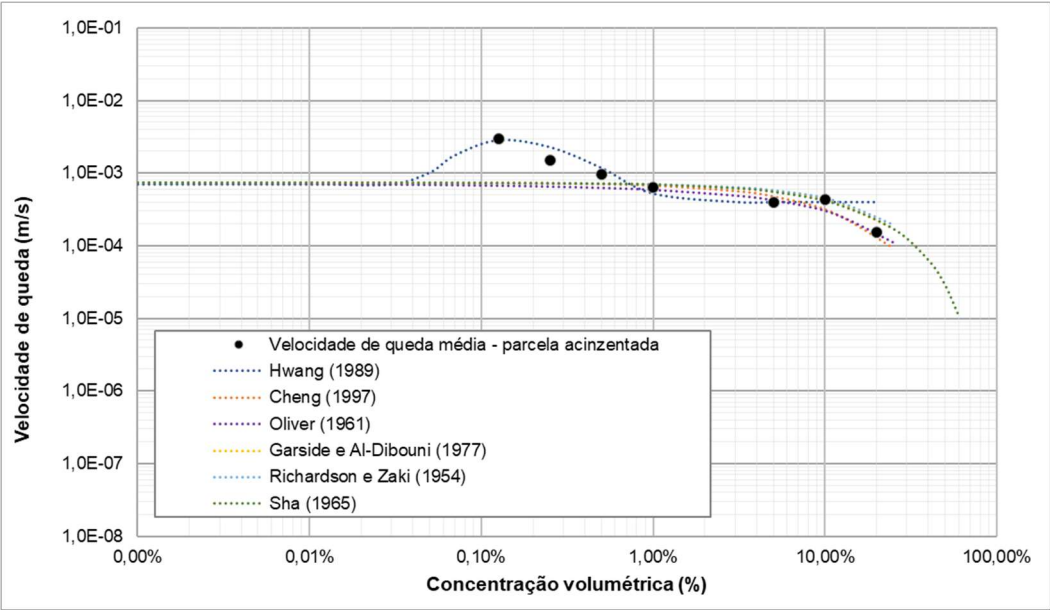
A Tabela 17 apresenta os valores obtidos para a variação da velocidade de queda com a concentração de rejeito e o respectivo valor de coeficiente de Nash-Sutcliffe e Raiz do Erro Quadrático Médio para cada equação comparada para a parcela acinzentada do rejeito.

Tabela 17 – Comparação dos resultados obtidos da variação da velocidade (m/s) de queda com a concentração de rejeito de minério de ferro para a parcela acinzentada com equações desenvolvidas empiricamente.

Parcela acinzentada do rejeito de minério de ferro	Cv (%)	Ensaio	Richardson e Zaki (1954)	Sha (1965)	Oliver (1961)	Soulsby (1997)	Garside e Al-Dibouni (1977)	Cheng (1997)	Hwang (1989)
	0,13%	2,99E-03	7,37E-04	7,36E-04	6,75E-04	6,8E-04	7,37E-04	7,38E-04	2,88E-03
	0,25%	1,49E-03	7,33E-04	7,31E-04	6,57E-04	6,8E-04	7,32E-04	7,33E-04	2,31E-03
	0,50%	9,69E-04	7,24E-04	7,20E-04	6,30E-04	6,8E-04	7,23E-04	7,25E-04	1,19E-03
	1,0%	6,32E-04	7,08E-04	6,99E-04	5,92E-04	6,7E-04	7,04E-04	7,09E-04	5,28E-04
	5,0%	3,93E-04	5,84E-04	6,23E-04	4,24E-04	6,0E-04	5,71E-04	6,78E-04	4,03E-04
	11%	4,32E-04	4,31E-04	5,55E-04	2,83E-04	5,0E-04	4,09E-04	4,79E-04	4,03E-04
	25%	1,54E-04	1,95E-04	3,92E-04	1,11E-04	2,9E-04	1,71E-04	2,90E-04	4,03E-04
	RMSE		0,91	0,92	0,94	0,94	0,91	0,91	0,34
	NASH		-6,01	-6,13	-6,55	-6,48	-6,01	-6,05	0,01

A mesma análise foi realizada de forma gráfica em escala logarítmica a partir da Figura 37, que apresentam os valores dos resultados médios alcançados no ensaio e os valores evidenciados através das equações empíricas.

Figura 37 - Comparação dos resultados obtidos da variação da velocidade de queda (m/s) com a concentração da parcela acinzentada do rejeito com equações desenvolvidas empiricamente.



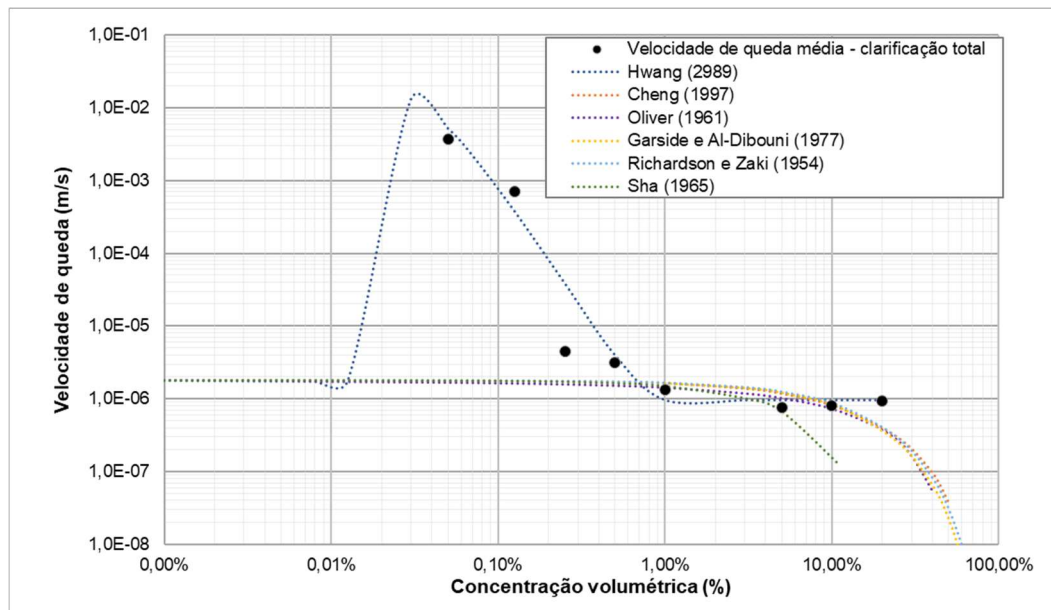
Já a Tabela 18 apresenta os valores obtidos para a variação da velocidade de queda com a concentração de rejeito para a clarificação total e o respectivo valor de coeficiente de Nash-Sutcliffe e Raiz do Erro Quadrático Médio para cada equação.

Tabela 18 – Comparação dos resultados obtidos da variação da velocidade de queda (m/s) com a concentração de rejeito de minério de ferro para a clarificação total da mistura com equações desenvolvidas empiricamente.

Clarificação total da mistura de rejeito de minério de ferro e água	Cv (%)	Ensaio	Richardson e Zaki (1954)	sha (1965)	Oliver (1961)	Soulsby (1997)	Garside e Al-Dibouni (1977)	Cheng (1997)	Hwang (1989)
	0,13%	6,96E-04	1,75E-06	1,73E-06	1,61E-06	1,6E-06	1,75E-06	1,76E-06	3,77E-04
	0,25%	4,48E-06	1,74E-06	1,69E-06	1,57E-06	1,6E-06	1,74E-06	1,75E-06	3,84E-05
	0,50%	3,18E-06	1,71E-06	1,62E-06	1,50E-06	1,6E-06	1,70E-06	1,73E-06	4,02E-06
	1,0%	1,32E-06	1,65E-06	1,48E-06	1,41E-06	1,6E-06	1,64E-06	1,69E-06	9,56E-07
	5,0%	7,57E-07	1,24E-06	1,01E-06	1,01E-06	1,4E-06	1,21E-06	1,62E-06	9,56E-07
	11%	8,1E-07	8,07E-07	6,64E-07	6,76E-07	1,2E-06	7,66E-07	1,17E-06	9,56E-07
	25%	9,3E-07	2,86E-07	1,26E-07	2,65E-07	6,9E-07	2,51E-07	7,53E-07	9,56E-07
	RMSE		1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	0,53
	NASH		-8,64	-8,64	-8,64	-8,64	-8,64	-8,64	-0,53

A Figura 38 que apresenta os valores dos resultados médios alcançados para a clarificação total da mistura e os valores evidenciados através das equações empíricas.

Figura 38 - Comparação dos resultados obtidos da variação da velocidade de queda com a concentração volumétrica de rejeito até a clarificação total da mistura com equações desenvolvidas empiricamente.



Conforme mencionado, houve uma calibração do tamanho da partícula e dos coeficientes da equação de Hwang (1989) para obter melhor aderência aos valores médios medidos. Observa-se que as equações de Richardson e Zaki (1954), Oliver (1961), Sha (1965), Cheng (1997), Soulsby (1997) e Garside e Al-Dibouni (1977) obtiveram respostas bastante similares de variação da velocidade de queda ω_c em relação a concentração volumétrica, indicando que a velocidade de queda começa a reduzir a partir de concentrações volumétricas de 1%, ponto em que as equações indicam melhor capacidade preditiva em relação aos dados medidos, mas ainda com valores do coeficiente de Nash-Stutcliffe negativos, com exceção da equação desenvolvida por Oliver (1961). Para concentrações volumétricas menores a 1%, as equações não apresentaram resultados satisfatórios.

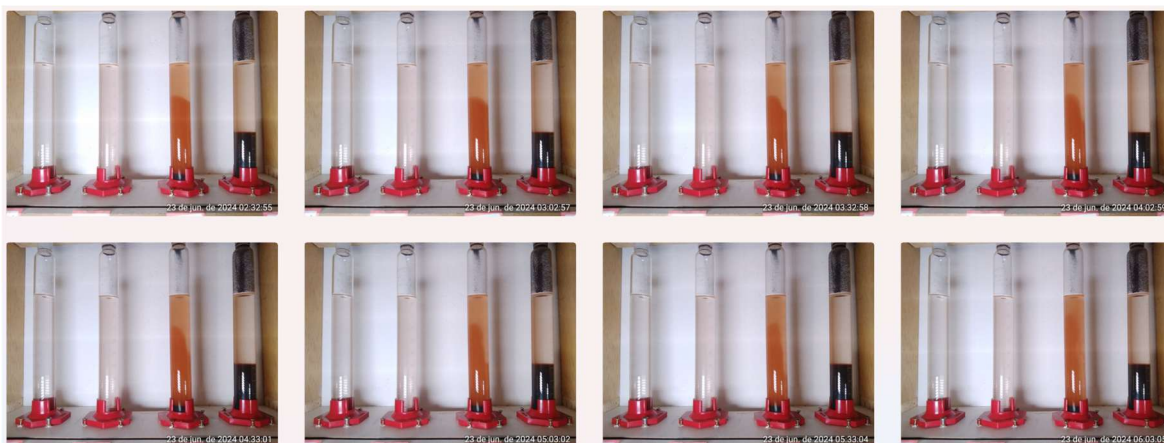
Destaca-se, que apenas a equação de Sha (1965) é disponibilizada no *software* do RiverFlow 2D para modificação da velocidade de queda da partícula (ω_s) segundo a concentração da mistura (ω_c) no módulo de transporte de sedimentos (HYDRONIA, 2022). Portanto, recomenda-se o uso de métodos adicionais de medição, para avaliar se a equação é a mais representativa para o rejeito de minério de ferro.

A equação que permitiu a melhor aderência foi a desenvolvida por Hwang (1989). O autor separou as três fases consideradas no processo de floculação avaliando-se

sedimentos coesivos. Apesar do rejeito de minério de ferro filtrado em análise não apresentar características de material coesivo, a equação permite calibrar os expoentes, coeficientes e intervalo de cada fase, permitindo maior liberdade para aderência aos valores medidos. Portanto, é preciso cautela na aplicação da equação sem a presença de resultados experimentais do material em estudo dada a elevada variabilidade da velocidade de queda com a concentração.

Outra ponderação do experimento interessante de ser destacada foi a ocorrência de uma difusão vertical, ilustrada pela Figura 39. Durante o processo de sedimentação, usualmente a superfície entre a mistura clarificada e a mistura com maior concentração é horizontal. Durante o experimento para a concentração volumétrica de 5%, passadas 13 horas do início do experimento, foi observada a sedimentação mais proeminente em apenas um lado, deixando a superfície entre as misturas de forma cada vez mais diagonal, até a total mistura na vertical. Acredita-se que um fator de interferência do experimento tenha sido o posicionamento dos holofotes próximo a lateral das provetas de 5% e 25%. Conforme já mencionado, uma maior temperatura diminui a viscosidade da água e acelera a velocidade de queda. No entanto, acredita-se que houve um gradiente de temperatura da direita para a esquerda que proporcionou o evento até a desestratificação da mistura e aumento da difusão.

Figura 39 – Ocorrência de difusão no ensaio de sedimentação em repouso.



Este é um fenômeno importante em reservatórios, já que diferenças de temperatura ao longo de suas profundidades, chamadas de estratificação térmica, interferem na dinâmica de transporte de sedimentos, tanto no processo de sedimentação, quanto no processo de difusão.

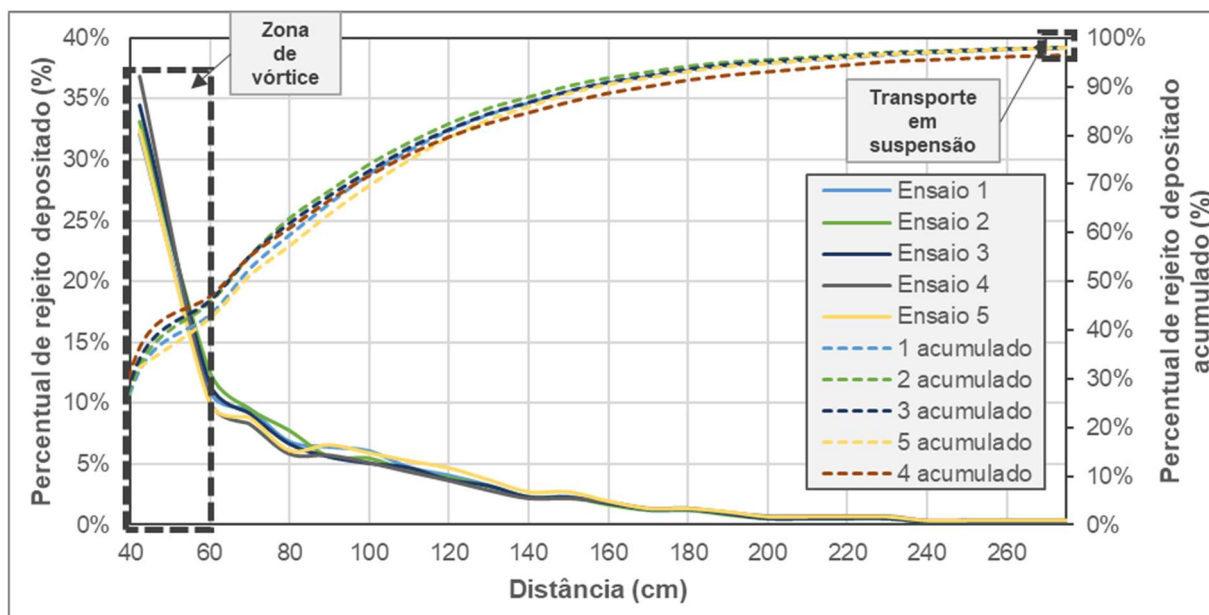
Quando ocorre a desestratificação térmica de um reservatório como a redução da temperatura superficial da água, são geradas correntes que ressuspendem sedimentos de fundo.

5.4 Deposição do rejeito em escoamento

O ensaio de deposição de sedimentos no canal foi realizado 5 vezes, conforme as condições descritas na Tabela 10. A duração dos ensaios levou cerca de um minuto entre a estabilização do escoamento no canal, o lançamento e deposição do rejeito de minério de ferro. Finalizadas as filmagens, o canal foi lentamente esvaziado para impedir que o rejeito depositado sofresse qualquer movimentação durante o processo. A separação dos trechos e coleta do material depositado foi realizada após 24 horas ou mais do experimento para garantir que o material coletado estivesse seco.

Os resultados da distribuição do rejeito de minério de ferro filtrado ao longo do canal são apresentados na Figura 40. Observa-se uma pequena variação entre os experimentos, o que aponta consistência nos resultados.

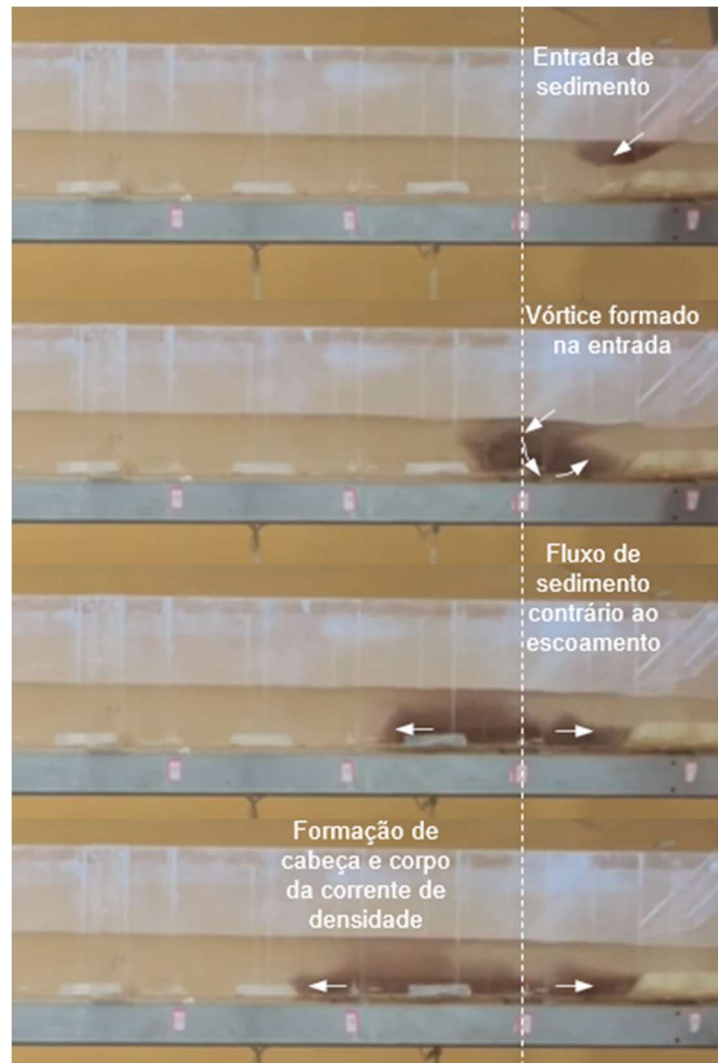
Figura 40 - Relação de massa de rejeito de minério de ferro na faixa granulométrica 0,125 mm a 0,090 mm depositada ao longo do canal.



Na primeira faixa do canal, nos primeiros 0,20 m, foi identificada a deposição de aproximadamente 35% (entre 32% e 37%) do rejeito total lançado. Observa-se na região a formação de um vórtice, em função de um vetor de fluxo contrário ao

escoamento, que aprisiona uma parcela significativa do material, conforme ilustrado na Figura 41.

Figura 41 – Formação de vórtice na entrada do canal.



Para minimizar a interferência observada na entrada do canal, recomenda-se suavizar o ângulo entre o fundo do canal e a soleira espessa.

A soleira utilizada no experimento apresenta dimensões de 0,05 m de altura e inclinação de 45° até o fundo do canal. No início do canal foi posicionada para garantir velocidades de escoamento ligeiramente mais elevadas e impulsionar o sedimento para o modo de transporte em suspensão. Ensaios iniciais sem a soleira resultaram na formação de um “bloco” de sedimento, rapidamente depositado no trecho inicial. Além disso, o lançamento de sedimentos também poderia ser melhor distribuído ao

longo do tempo para impedir volumes muito espessos que possibilitaria essa formação de “blocos”.

No trecho seguinte do canal, próximos 0,60 m, observa-se um declínio acentuado na deposição. O trecho inicial indica deposição de 12% a 8% do rejeito total e chega a apenas 2,5% no trecho de 0,80 m a jusante da entrada de rejeito no canal.

A partir das imagens registradas, nota-se que não houve mistura completa do material em toda a seção do canal, formando uma corrente mais densa próxima ao fundo. Na Figura 42 são identificados os parâmetros da corrente de densidade formada no canal, com a composição da cabeça, corpo e vórtices de Kelvin-Helmholtz na camada superior do corpo.

Figura 42 – Identificação dos parâmetros da corrente de densidade formada no canal.



Os vórtices de Kelvin-Helmholtz formados permitiram a entrada de água circundante na corrente gerando diluição da mistura, até a homogeneização da concentração ao longo da seção do canal.

No trecho entre 0,80 m e 1,40 m a deposição continua a diminuir, mas de forma mais gradual. A partir de 1,40 m, o percentual de rejeito depositado é relativamente baixo e permanece quase constante. Nessa faixa, os valores se estabilizam em torno de 0,5% do rejeito total e o transporte em suspensão se torna mais difícil de identificar por imagem.

A Figura 43 apresenta o transporte de rejeito de minério de ferro filtrado ao longo do canal em intervalos de um segundo.

Figura 43 - Deposição de rejeito de minério de ferro na faixa granulométrica 0,125 mm a 0,090 mm no canal com lançamento de 200 g no início do escoamento (fotos a cada segundo).



O material depositado no canal representa cerca de 97% a 98% do total de rejeito lançado, e apenas cerca de 4 g de rejeito de minério de ferro foram transportados em suspensão (carga em *wash load*). A Tabela 19 apresenta a comparação da eficiência de retenção obtida com as equações teóricas de Camp (1945), Chen (1975) e Huber e Dickinson (1988).

Tabela 19 – Análise da eficiência de retenção do canal.

Parâmetro	Valor
Concentração volumétrica	5%
Concentração mássica (g/L)	131
Eficiência de retenção obtida $\overline{TE}$ (%)	$97,8 \pm 0,7\%$
Velocidade da partícula $\overline{\omega}_s$ (m/s)	0.01
Velocidade crítica ω_c (m/s)	0.003
Eficiência de retenção – (CAMP, 1945)	100%
Fator adimensional de turbulência α	0.091
Eficiência de retenção – (CHEN, 1975)	98.0%
Eficiência de retenção Modelo SWMM (HUBER; DICKINSON, 1988)	98.9%

A equação que melhor se aproximou da eficiência de retenção obtida no ensaio foi a equação de Chen (1975), seguida de Huber e Dickinson (1988). A teoria de Camp (1945) desconsidera a turbulência na mistura do sedimento na seção transversal, o que não foi observado no experimento, cujo fator α indicou elevada turbulência.

Conforme mencionado, foram observadas formação de vórtice na entrada do sedimento devido a alteração do fluxo do escoamento com a entrada de sólidos próximo a rampa da soleira de 5,0 cm da largura e 45° que altera as linhas de fluxo locais, com aumento da velocidade. Os sedimentos formam momentaneamente uma barreira gerando um fluxo contrário ao escoamento. Além disso não observados vórtices na superfície superior da corrente de densidade, os chamados vórtices de Kelvin-Helmholtz. Tais vórtices ocorrem pelas diferenças de velocidade da corrente de água circundante e da corrente de densidade. Destaca-se que a distância da câmara não permitiu avaliar com precisão a presença de complexo de lobos e rachas.

A Tabela 20 apresenta a comparação da velocidade média do escoamento obtido através da relação de vazão e área molhada, a velocidade média da cabeça da corrente, além dos valores médios da altura cabeça e do corpo da corrente foram

obtidos através da análise de imagens pelo software *Tracker* e o número de Richardson obtido através das equações (9) e (11).

Tabela 20 – Avaliação da corrente de densidade.

Parâmetro	Valor
Número de Richardson Ri	4,71
Coeficiente de carregamento w_e	0,0003
Velocidade média da corrente (m/s)	$0,194 \pm 0,071$
Altura da cabeça da corrente (m)	$0,034 \pm 0,017$
Altura do corpo da corrente (m)	$0,0546 \pm 0,022$

O número de Richardson indica o regime do grau de mistura na interface, valores de $Ri > 1,0$ indicam correntes de densidade subcríticas. No entanto, o valor não é considerado alto suficiente para indicar uma corrente de densidade estável e estratificada. Já o coeficiente de carregamento indica a razão de incorporação da água ambiente para dentro da corrente. Quanto maior o valor Richardson, menor é a ocorrência de mistura na interface entre a corrente e a água ambiente, conforme experimento.

No entanto, é importante destacar que apenas uma concentração e condições de escoamento tornam a análise de resultados bastante limitada. A partir do experimento foi possível verificar uma separação granulométrica, estando a parcela mais fina do material retido entre as peneiras de abertura de 0,125 mm e 0,090 mm. Indicando a influência da velocidade de queda na deposição de sedimentos. No entanto, análises com outras faixas granulométricas são necessárias para avaliar a relação do processo de sedimentação, com a velocidade de queda e um escoamento de turbulência variável.

6 CONCLUSÕES

A presente dissertação apresentou a caracterização de uma amostra de rejeito de minério de ferro filtrado e avaliou experimentalmente a velocidade de queda da partícula para diferentes concentrações de rejeito, sinalizando as equações empíricas que melhor representam os fenômenos. Ainda estabeleceu, de forma preliminar, um método de estudo do processo de deposição do rejeito em um reservatório de contenção.

Os rejeitos do beneficiamento de minério de ferro podem variar segundo a distribuição granulométrica, heterogeneidade geológica natural dos bens minerais, o grau de cominuição nos processos de tratamento e através dos métodos de beneficiamento do minério. Isto posto, a amostra de rejeito de minério de ferro utilizada na pesquisa foi caracterizada como areia fina siltosa, com divisão em dois grupos quanto a composição e massa específica: a parcela arenosa (entre média e fina), composta majoritariamente por sílica, e apresenta massa específica próxima a $2,700 \text{ g/cm}^3$, e a parcela fina, composta por óxidos de ferro e sílica, com massa específica próxima a $4,000 \text{ g/cm}^3$. Conforme mencionado, o rejeito em questão passa pela etapa de britagem, moagem, flotação, espessamento e filtragem para deposição a seco em uma pilha composta de rejeito e estéril. Destaca-se que o rejeito da deslamagem não é conduzido para a filtração, garantindo assim o seu caráter arenoso.

É importante ressaltar que até mesmo simplificações frequentemente utilizadas nas análises do comportamento de sedimentos naturais, pretensamente bem conhecidos, podem ser não representativas. Foi o caso do sedimento coletado no reservatório da PCH de Salto do Paraopeba, cujo valor de massa específica foi igual a $2,875 \text{ g/cm}^3$, superior ao comumente utilizado para areias naturais, compostas majoritariamente de sílica ($2,650 \text{ g/cm}^3$). Adicionalmente, o fator de forma obtido, próximo a 0,58, foi inferior ao usualmente aplicado, igual a 0,7. A particularidade do sedimento corresponde à presença de outros minerais marcantes, como alumínio e ferro, dadas as características geológicas da bacia. Além disso, o reservatório em questão está localizado na cabeceira do rio, o que indica menor ação de lapidação e regularização do sedimento com os movimentos de rolamento ao longo do rio. Além da presença de minérios como Ferro e Alumínio que configuram formas e texturas distintas da sílica.

A quantificação do parâmetro da velocidade de queda do grão por meio de uma coluna de sedimentação é uma técnica simples e de fácil aplicação, tendo já sido reproduzida por diversos autores. Conforme esperado, a velocidade de queda aumenta à medida que o tamanho do grão aumenta.

Os resultados para o sedimento da PCH de Salto do Paraopeba para a faixa granulométrica de grãos entre 0,500 mm e 0,425 mm alcançaram velocidade de queda média de 6,9 cm/s, enquanto na faixa de 0,090 mm e 0,063 mm, a velocidade média foi de apenas 0,8 cm/s. Para o rejeito de minério de ferro a variação da velocidade de queda foi de 5,9 cm/s para partículas entre 0,500 mm e 0,425 mm, e de 0,8 cm/s para as partículas entre 0,090 mm e 0,063 mm. Para ambos os materiais observou-se maior dispersão de resultados para os grãos maiores em comparação às faixas granulométricas entre 0,150 mm e 0,063 mm.

Os resultados obtidos para o rejeito de minério de ferro indicaram valores inferiores aos do sedimento da PCH de Salto do Paraopeba, para todas as faixas granulométricas analisadas. O que possivelmente está relacionado às diferenças observadas na massa específica da parcela arenosa do rejeito ser inferior à do sedimento do reservatório, a temperatura da água mais baixa para o rejeito de minério de ferro em comparação à do sedimento natural e nas diferenças de forma do grão das partículas, sendo o rejeito menos esférico que o sedimento da PCH.

Somente para a parcela mais fina ensaiada, entre 0,090 mm e 0,063 mm, os resultados para ambos os materiais foram similares. Esse resultado evidencia a necessidade de avaliar tais parâmetros por faixa granulométrica, o que em geral também não é permitido nos modelos numéricos que se tem conhecimento.

Quando comparadas com equações empíricas e amplamente utilizadas em modelos de numéricos hidrodinâmicos acoplados com transporte de sedimento, os resultados indicaram que a melhor correlação, com menor valor de RMSE e coeficiente de NSE próximo a unidade, foi obtida pela equação desenvolvida por Cheng (1997) tanto para o sedimento da PCH de Salto do Paraopeba quanto para o rejeito de minério de ferro. Destaca-se que a aplicação desta equação é simples e não considera o fator de forma e esfericidade da partícula. Outros autores como Rubey (1933), Jiménez e Madsen (2004) e Wu e Wang (2006) também apresentaram valores bastante satisfatórios.

Para o sedimento de Salto do Paraopeba, os resultados de Camenen (2007) indicaram boa aderência. A menor capacidade de predição foi Dietrich (1982), excluindo-se a equação de Stokes que não deve ser aplicada para partículas com Reynolds da partícula superior a 1,0. Observa-se que todas as equações subestimaram a velocidade de queda para a faixa granulométrica mais fina, entre 0,063 mm e 0,090 mm. Possivelmente, devido às dificuldades da obtenção de resultados para partículas menores, que apresentam pouca alteração de posição vertical entre um quadro e outro. Para uma análise mais precisa, câmeras de melhor de resolução são recomendadas, pois possibilitam a utilização de menor número de partículas no experimento, diminuindo a influência da interação de partículas vizinhas para obtenção da velocidade de queda.

Para a parcela fina do rejeito de minério de ferro foram avaliadas a variação da velocidade de queda w_c com as concentrações volumétricas de 0,13%, 0,25%, 0,50%, 1,0%, 5,0%, 11% e 25% a partir do ensaio de provetas. A velocidade de queda foi medida em dois momentos: o primeiro até a mistura perder a tonalidade preta/acinzentada - que indica a parcela de minério (Fe_2O_3), e permanecer somente a tonalidade laranja, e o segundo até a clarificação completa.

Observou-se uma clara tendência de diminuição da velocidade de queda conforme o aumento da concentração volumétrica do rejeito. Para a parcela acinzentada, em baixas concentrações, 0,01%, a velocidade é da ordem de 10^{-3} m/s, enquanto em altas concentrações, 25%, a velocidade cai para cerca de 10^{-4} m/s. Já para a clarificação total, a concentração de 0,13% e 0,25% não indicou diferença elevada em comparação com a velocidade de queda inicial obtida, o que não ocorre para as demais concentrações, em que a redução da velocidade de queda é bastante significativa com valores entre 10^{-6} m/s e 10^{-7} m/s.

Esta relação inversa pode ser explicada pelo aumento da interação entre as partículas em concentrações mais elevadas, caracterizando a velocidade de queda confinada (*hindred*), em que a maior interferência entre as partículas causa maior resistência do fluido e com formação de flocos distintos que podem aumentar o tamanho e diminuir a densidade. Além disso, em concentrações mais altas, a viscosidade aparente da suspensão aumenta, o que também contribui para a diminuição da velocidade de

queda. A equação com maior capacidade de predição da velocidade de queda com a concentração foi a desenvolvida por Hwang (1989).

Os resultados obtidos de velocidade de queda da partícula e velocidade de queda referente a concentração são muito relevantes, pois tratam de parâmetros intensamente utilizados nas equações teóricas e empíricas para descrever os processos de transporte e deposição de sedimentos. No entanto, a análise experimental de partículas depositando em um fluido em repouso, dificilmente ocorre quando se trata de transporte fluvial. Dessa forma, a análise deve incorporar o efeito da turbulência do escoamento pelas interações entre as partículas e pelas diferenças de densidades formadas pela mistura e o fluido circundante ambiente. A avaliação foi realizada em um canal acrílico, mantendo-se constante a vazão igual a 2,0 L/s e a declividade igual a 0,005 m/m. O ensaio foi realizado apenas para a concentração volumétrica de 5%.

Destaca-se que o ensaio tinha o objetivo de iniciar a avaliação dos procedimentos experimentais, já que a análise de resultados se torna bastante limitada para condições únicas de concentração, vazão e declividade. A análise de imagens permitiu observar a formação e deslocamento da corrente de densidade do canal, com a formação de cabeça, corpo, vórtices de Kelvin-Helmholtz, até total diluição. No entanto, a utilização da função *zoom out* x 0,5 e o posicionamento da câmera para observar todo o experimento não permitiu avaliar com maior precisão as formas geométricas da corrente de densidade formada.

Na primeira faixa do canal, primeiros 0,20 m, foi identificada a deposição de aproximadamente 35% (entre 32% e 37%) do rejeito total lançado. Observa-se na região a formação de um vórtice, em função de um vetor de fluxo contrário ao escoamento, que aprisiona uma parcela significativa do material. No trecho seguinte do canal, próximos 0,60 m, observa-se um declínio acentuado na deposição, passando de 12% a 8%. No trecho a 0,80 m a jusante da entrada de rejeito no canal a deposição de rejeito ficou entre 2,5%, e 0,5% a partir de 1,40 m, região onde foi observada a mistura completa na seção.

O material que permaneceu retido no canal representa aproximadamente 97% a 98% do total de rejeito lançado, e apenas cerca de 4 g de rejeito de minério de ferro foram

transportados em suspensão (carga em *Wash load*). A equação que melhor se aproximou da eficiência de retenção obtida no ensaio foi a equação de Chen (1975), seguida de Huber e Dickinson (1988).

Por fim, ressalta-se a importância da devida caracterização do sedimento e da velocidade queda para aplicação de equações empíricas e teóricas no que tange estudos relacionados a transporte e deposição de sedimentos, além de conhecer os devidos intervalos de validade e limitações.

Destacam-se as informações quanto à distribuição granulométrica, massa específica e origem do sedimento para caracterização mineralógica, forma dos grãos e velocidade de queda como essenciais para elaboração de estudos e projetos relacionados a transporte de sedimentos. Além disso, questões quanto a condições de temperatura da água, concentração volumétrica, condições de geometria e escoamento afetam significativamente o processo de transporte e deposição de sedimento e não devem ser negligenciadas.

7 RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados obtidos no desenvolvimento da pesquisa para aplicação à presente dissertação, para melhor compreensão do processo de transporte de sedimentos referente ao rejeito de minério de ferro, recomenda-se:

- Realizar ensaio de velocidade de queda em uma coluna de sedimentação com coleta de concentração em diferentes alturas e comparar com os resultados obtidos do ensaio de provetas;
- Realizar o ensaio do canal para diferentes vazões, declividades, concentrações, condições de leito (móvel e fixo), condições geométricas no início do canal e formas de entrada de sedimento (entrada de um único pulso de concentração e em quantidades uniformes de concentração em pequenos intervalos de tempo);
- Posicionar mais câmeras para avaliar as variações dos parâmetros de densidade de corrente, quanto a forma, velocidade e instabilidade e como afetam o processo de sedimentação;
- Fazer medições de turbidez ao longo da seção do canal para caracterizar o perfil de concentração.
- Realizar simulação numérica de transporte de sedimentos do canal e verificar a representatividade do experimento junto às equações empíricas e teóricas adequadas para a calibração dos valores medidos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. 2022. Resolução nº 95, de 07 de fevereiro de 2022. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7181: SOLO – Análise granulométrica. Rio de Janeiro/RJ, 1984.

ALLEN, T. **Particle Size Measurement**. 3. London: [s. n.], 1981.

ALVES, P. I. A. **Empilhamento de rejeito filtrado: A expansão de uma alternativa para substituição de barragens**. 2020. Dissertação de Mestrado - UFOP, Ouro Preto, 2020.

ANDRADE, S. B. de; VALE, V. L. do; SALIBA, A. P. M. AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS NA BACIA DO RIO PARAOPÉBA APÓS RUPTURA DA BARRAGEM I-BRUMADINHO. **Revista Augustus**, v. 24, n. 49, p. 100–112, 2020.

BERLAMONT, J.; OCKENDEN, M.; TOORMAN, E.; WINTERWERP, J. The characterization of cohesive sediment properties. **Coastal Engineering**, Amsterdam, v. 21, p. 105–128, 1993.

BRAGA, F. Y. A. **UTILIZAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE FILTRAGEM DE REJEITOS PARA EMPILHAMENTO A SECO**. 2021. Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

BROWN, C. B. Sedimentation in reservoirs. In: 1944, **Proc. ASCE**. [S. l.: s. n.]

BRUNE, G. M. Trap efficiency of reservoirs. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 34, n. 3, p. 407–418, 1953.

BUZZI, D. C.; VON KRÜGER, F. L.; MACHADO, G. A. de A.; SOLÉ, R. A. L.; MENDES, J. J.; ARAÚJO, F. G. da S. **CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE REJEITOS ARENOSOS**. Ouro Preto: [s. n.], 2020. Disponível em: www.gorceix.org.br/depec.

CAMENEN, B. Simple and General Formula for the Settling Velocity of Particles. **Journal of Hydraulic Engineering, ASCE**, p. 229–233, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94292007133:2229>

CAMPELLO, B. S. C. **Estudo da velocidade de queda e do início do movimento das partículas de borracha e areia**. 2017. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, 2017.

CAMPERA, F. A. N. **ESTUDO DE UMA DESCIDA DE ÁGUA MODULAR POR MEIO DE MODELO FÍSICO REDUZIDO E CFD**. 2020. Dissertação de Mestrado - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte, 2020.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

CHENG, N.-S. Simplified settling velocity formula for sediment particle. **Journal of Hydraulic Engineering, ASCE**, v. 123, n. 2, p. 129–152, 1997.

CHENG, N.-S. Comparison of Settling-Velocity-Based Formulas for Threshold of Sediment Motion. **Journal of Hydraulic Engineering, ASCE**, v. 134, n. 8, p. 1136–1141, 2008. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:8\(1136\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:8(1136))

CHIEN, N.; WAN, Z. **Mechanics of Sediment Transport**. ASCE Press ed. [S. l.]: American Society of Civil Engineers, 1999. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1061/9780784404003>

CHURCHILL, M. A. Discussion of analysis and use of reservoir sedimentation data. *In*: 1948, **Proceedings of the federal interagency sedimentation conference. bureau of reclamation, US Department of the Interior, Washington, DC**. [S. l.: s. n.] p. 139–140.

COMINI DE ANDRADE, B. C.; ZEGARRA, J. L. T. Determinación experimental de la velocidad de caída de sedimentos no cohesivos. **Revista chilena de ingeniería**, v. 28, n. 2, p. 236–247, 2020. Disponível em:

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000200236>. Acesso em: 12 abr. 2024.

COREY, A. T. Influence of shape on the fall velocity of sand grains. **Colorado A&M College**, 1949.

CPRM. **MONITORAMENTO ESPECIAL DA BACIA DO RIO PARAÓPEBA RELATÓRIO 02: Monitoramento Geoquímico**. Belo Horizonte: [s. n.], 2019.

DA LUZ, A. B.; LINS, F. F. Introdução ao Tratamento de Minérios. *In: Tratamento de Minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, 2010.

DEY, S.; ALI, S. Z.; PADHI, E. **Terminal fall velocity: The legacy of Stokes from the perspective of fluvial hydraulics**. [S. l.]: Royal Society Publishing, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0277>

DIETRICH, W. E. Settling Velocity of Natural Particles. **WATER RESOURCES RESEARCH**, v. 18, n. 6, p. 1615–1626, 1982.

DOS SANTOS, J. R.; MENEGUELLI, M. R. S.; SARTÓRIO, E. A. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de rejeito de minério de ferro na camada de sub-base de pavimentação rodoviária**. Espírito Santo: Departamento de Engenharia de Infraestrutura Urbana - IFES, 2022.

DUARTE, B. B. O. **Caracterização mineralógica e microestrutural visando a previsibilidade de processo de minério de ferro**. 2021. Dissertação de mestrado - UFMG, Belo Horizonte, 2021.

ELTILIB, R. A. E. E.; HUSSAIN, H.; KAYIEM, Al.; JAAFAR, A. Investigation on the Particle Settling Velocity in Non-Newtonian Fluids. **Journal of Applied Sciences**, v. 11, n. 9, p. 1528–1535, 2011.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico**. 2000. Tese de Doutorado - Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

FOLK, R. T. L. STUDENT OPERATOR ERROR IN DETERMINATION OF ROUNDNESS, SPHERICITY, AND GRAIN SIZE. **Journal of Sedimentary Research**, v. 25, n. 4, p. 297 – 301, 1955. Disponível em: <https://doi.org/10.1306/74D70493-2B21-11D7-8648000102C1865D>

FRACARO, T. P. **Análise do comportamento mecânico de rejeito de minério de ferro submetido a ativação alcalina pelo método “two parts”**. 2022. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

FRAGA, G. F. **Análise experimental da velocidade de sedimentação de partículas de rejeito de mineração**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

GALVÃO-SOBRINHO, A. R. V. **Metodologia para implantação de um sistema de disposição de rejeitos em minério de ferro na região do semiárido: estudo de caso**. 2014. Dissertação de Mestrado em Engenharia Sanitária - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, 2014.

GÖGÜS, M.; IPEKÇI, O. N.; KÖKPINAR, M. A. Effect of particle shape on fall velocity of angular particles. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 127, n. 10, p. 860–869, 2001.

GU, L.; DAI, B.; ZHU, D. Z.; HUA, Z.; LIU, X.; DUIN, B. van; MAHMOOD, K. Sediment modelling and design optimization for stormwater ponds. **Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques**, v. 42, n. 1, p. 70–87, 2017 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/07011784.2016.1210542>

GU, L.; DAI, B.; ZHU, D. Z.; HUA, Z.; LIU, X.; VAN DUIN, B.; MAHMOOD, K. **Sediment modelling and design optimization for stormwater ponds**. [S. l.]: Taylor and Francis Ltd., 2017 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/07011784.2016.1210542>

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. 2011. Dissertação de Mestrado - UFMG, Belo Horizonte, 2011.

HAN, C.; TAN, Y.; CHU, L.; SONG, W.; YU, X. Flocculation and Settlement Characteristics of Ultrafine Tailings and Microscopic Characteristics of Flocs. **Minerals**, v. 12, n. 2, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/min12020221>

HEINEMANN, H. G. A new sediment trap efficiency curve for small reservoirs 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 17, n. 5, p. 825–830, 1981.

HUANG, T.-C. **A sedimentologic study of Charlotte Harbour, southwestern Florida**. 1981. Tese de Doutorado - Sedimentological Research Laboratory, Florida State University, 1981.

HUBER, W. C.; DICKINSON, R. E. **STORM WATER MANAGEMENT MODEL, VERSION 4: USER'S MANUAL**. Georgia: [s. n.], 1988.

HWANG, K. N. **Erodibility of fine sediment in wave-dominated environments**. 1989. Dissertação de mestrado - University of Florida, Florida, 1989.

HYDRONIA. **RiverFlow2D Two-Dimensional Flood and River Dynamics Model - Reference Manual**. [S. l.: s. n.]

JIMÉNEZ, J. A.; MADSEN, O. S. Simple Formula to Estimate Settling Velocity of Natural Sediments. **J. Waterway**, v. 129, n. 2, p. 70–78, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-950X2003129:270>

JULIEN, P. Y. **Erosion and Sedimentation**. 2nd. ed. New York: Cambridge University Press, 2010.

MANNING, A. J.; LANGSTON, W. J.; JONAS, P. J. C. A review of sediment dynamics in the Severn Estuary: Influence of flocculation. **Marine Pollution Bulletin**, v. 61, n. 1–3, p. 37–51, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.12.012>

MANTOVANELLI, A.; RIDD, P. V. Devices to measure settling velocities of cohesive sediment aggregates: A review of the in situ technology. **Journal of Sea Research**, v. 56, n. 3, p. 199–226, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seares.2006.05.002>

MCCUEN, R. H. The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 18, p. 37–53, 1973.

MEND, M. E. N. D. **Report 2.50.1 Study of Tailings Management Technologies**. Canadá: [s. n.], 2017.

MIDDLETON, G. V. Sediment Deposition from Turbidity Currents. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 21, n. Volume 21, 1993, p. 89–114, 1993. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev.ea.21.050193.000513>

MIKKELSEN, O. A.; HILL, P. S.; MILLIGAN, T. G. Seasonal and spatial variation of floc size, settling velocity, and density on the inner Adriatic Shelf (Italy). **Continental Shelf Research**, v. 27, n. 3–4, p. 417–430, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.11.004>

MINHONI, R. T. D. A. **ESTIMATIVA DO ASSOREAMENTO DO RESERVATÓRIO DA PCH PIPOCA, MINAS GERAIS**. 2013. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y. Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. **General Series, Utah Water Research Laboratory G85-3**, p. 260–279, 1985. Disponível em: <https://eurekamag.com/research/019/725/019725249.php>

OLIVEIRA, M. L. M.; LUZ, J. A. M.; LACERDA, C. M. M. **Espessamento e Filtragem**. Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.

PALU, M. C.; JULIEN, P. Y. Modeling the Sediment Load of the Doce River after the Fundão Tailings Dam Collapse, Brazil. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 145, n. 5, 2019 a. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001582](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001582)

PALU, M. C.; JULIEN, P. Y. Modeling the Sediment Load of the Doce River after the Fundão Tailings Dam Collapse, Brazil. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 145, n. 5, 2019 b. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001582](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001582)

PEREIRA, C. C.; PICANÇO, J. L. **Caracterização geotécnica e geoquímica dos rejeitos da barragem da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho (MG), em decorrência do desastre de.** [S. l.: s. n.].

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta.** 2013. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2013.

POWERS, M. C. A New Roundness Scale for Sedimentary Particles. **Journal of Sedimentary Research**, v. 23, p. 117–119, 1953. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:130206869>

PUHL, E. **MORFODINÂMICA E CONDIÇÃO DE EQUILÍBRIO DO LEITO SOB A AÇÃO DE CORRENTES DE TURBIDEZ.** 2012. Tese de Doutorado - UFGRS, Porto Alegre, 2012.

RAUDKIVI, A. J.; WITTE, H.-H. Development of bed features. **Journal of Hydraulic Engineering, ASCE**, v. 116, n. 9, p. 1063–1079, 1990.

ROCHA, L.; PERES, A. E. C. Aproveitamento econômico das lamas de ferro. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 62, n. 3, p. 291–295, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672009000300006>

RUBEY, W. W. Settling velocities of gravel, sand and silt particles. **American Journal of Science**, p. 325–338, 1933. Disponível em: <https://doi.org/10.2475/ajs.s5-25.148.325>

SAMPAIO, J. A.; ADÃO, B. da L.; FRANÇA, S. C. A. Separação Magnética e Eletrostática. *In*: SAMPAIO, J. A. (org.). **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, 2010. v. 5ª Edição, p. 367–395.

SCAPIN, B. A. **ESTUDO DA DINÂMICA DE CORRENTES DE TURBIDEZ EM SISTEMAS CANAL-BACIA POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM DIFERENÇAS FINITAS DE SEGUNDA ORDEM.** 2022. Dissertação de Mestrado - UFGRS, Porto Alegre, 2022.

SHANKAR, M. S.; PANDEY, M.; SHUKLA, A. K. Analysis of existing equations for calculating the settling velocity. **Water (Switzerland)**, v. 13, n. 14, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13141987>

SIMPSON, J. E. **Gravity Currents: In the Environment and the Laboratory**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

SOULSBY, R. **Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications**. [S. l.]: Telford, 1997.

STOKES, G. G. ON THE EFFECT OF THE INTERNAL FRICTION OF FLUIDS ON THE MOTION OF PENDULUMS. **Transactions of the Cambridge Philosophical Society**, v. 3, n. IX, p. 1880–1905, 1851.

TAN, G.; CHEN, P.; DENG, J.; XU, Q.; TANG, R.; FENG, Z.; YI, R. Review and improvement of conventional models for reservoir sediment trapping efficiency. **Heliyon**, v. 5, n. 9, p. e02458, 2019. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02458>

TAN, Y.; MENG, X.; JIANG, Z.; HAN, C.; GUO, M. Research on Flocculant Selection for Classified Fine Tailings Based on Micro-Characterization of Floc Structure Characteristics. **Materials**, v. 15, n. 7, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15072460>

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). **HEC-RAS 2D Sediment Technical**. [S. l.]: Davis: Hydrologic Engineering Center, 2022.

VAN RIJN, L. C. Sediment transport, part II: Suspended Load Transport. **Journal of Hydraulic Engineering, ASCE**, v. 110, n. 11, p. 1613–1641, 1984.

VENTURA, R. J. **Efeitos do uso de floculante e coagulante na sedimentação de rejeito de minério de ferro**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso - CEFET-MG, Araxá, 2018.

VIGLIONE, A. de O. **Caracterização e Reaproveitamento De Rejeito De Minério De Ferro Pallet Feed**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso - CEFET-MG, Belo Horizonte, 2018.

WAN, Y.; WU, H.; ROELVINK, D.; GU, F. Experimental study on fall velocity of fine sediment in the Yangtze Estuary, China. **Ocean Engineering**, v. 103, p. 180–187, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.04.076>

WARD, P. R. B. Sediment transport and a reservoir siltation formula for Zimbabwe-Rhodesia. **Civil Engineer in South Africa**, v. 22, n. 1, p. 9–15, 1980.

WINTERWERP, J. C.; VAN KESTEREN, W. G. M. Introduction to the Physics of Cohesive Sediment in the Marine Environment. **Geological Magazine**, v. 143, n. 1, p. 137–137, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/s0016756806211944>

WU, W.; WANG, S. S. Y. Formulas for Sediment Porosity and Settling Velocity. **Journal of Hydraulic Engineering, ASCE**, v. 132, n. 8, p. 858–862, 2006. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:8\(858\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:8(858))

ZHANG, R. **River Dynamics**. Beijing: [s. n.], 1961.

ZHANG, Z.; NONG, H.; LI, Y.; ZHAO, L.; GAO, H. Effects of ballasting particles on settling rate of iron ore tailings. **Particulate Science and Technology**, v. 38, n. 4, p. 427–432, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02726351.2018.1558320>

ZHIYAO, S.; TINGTING, W.; FUMIN, X.; RUIJIE, L. A simple formula for predicting settling velocity of sediment particles. v. 1, n. 1, p. 37–43, 2008. Disponível em: <http://kkb.hhu.edu.cn>,

APÊNDICE A – Fator de forma e Esfericidade das partículas de rejeito de minério de ferro e do sedimento do reservatório da PCH de Salto do Paraopeba

Tabela A.1 - Fator de forma estimado para o rejeito de minério de ferro entre 0,125 mm e 0,500 mm.

Faixa granulométrica	0,250 mm a 0,500 mm				0,125 mm a 0,250 mm				
	Partículas	la	lb	lc	Sf	la	lb	lc	Sf
1	338	193	95	0,372	248	203	74	0,330	
2	393	245	93	0,300	152	118	67	0,500	
3	568	369	207	0,452	225	110	49	0,311	
4	674	251	105	0,255	196	182	146	0,773	
5	606	371	220	0,464	231	164	124	0,637	
6	707	299	233	0,507	412	266	183	0,553	
7	690	229	104	0,262	293	167	98	0,443	
8	532	254	218	0,593	218	66	63	0,525	
9	526	191	109	0,344	398	213	118	0,405	
10	694	360	32	0,064	196	173	39	0,212	
11	477	416	115	0,258	318	196	93	0,373	
12	596	335	129	0,289	238	134	73	0,409	
13	685	248	107	0,260	356	232	79	0,275	
14	346	309	238	0,728	163	99	83	0,653	
15	451	392	196	0,466	216	106	41	0,271	
16	870	433	184	0,300	218	42	29	0,303	
17	337	242	222	0,777	239	190	184	0,863	
18	942	188	131	0,311	147	140	49	0,342	
19	352	242	162	0,555	333	163	51	0,219	
20	474	272	255	0,710	175	165	41	0,241	
21	316	296	160	0,523	284	166	125	0,576	
22	462	186	176	0,600	282	88	51	0,324	
23	584	461	369	0,711	325	321	83	0,257	
24	588	396	281	0,582	364	181	134	0,522	
25	512	436	313	0,662	321	166	133	0,576	
Sf médio				0,454	Sf médio				0,436
Desvio Padrão				0,188	Desvio Padrão				0,177

Tabela A.2 - Fator de forma estimado para o rejeito de minério de ferro entre 0,0063 mm e 0,125 mm.

Faixa granulométrica	0,063 mm a 0,125 mm				< 0,063 mm				
partículas	la	lb	lc	Sf	la	lb	lc	Sf	
1	86	82	34	0,405	108	18	10	0,227	
2	68	57	26	0,418	19	11	4	0,277	
3	118	68	19	0,212	61	42	9	0,178	
4	118	68	18	0,201	101	60	16	0,206	
5	114	80	57	0,597	48	29	9	0,241	
6	153	69	12	0,117	42	11	8	0,372	
7	75	59	32	0,481	54	36	18	0,408	
8	98	77	49	0,564	37	22	11	0,386	
9	121	90	38	0,364	90	35	15	0,267	
10	111	64	14	0,166	87	68	28	0,364	
11	94	66	21	0,267	55	37	11	0,244	
12	93	54	43	0,607	35	25	20	0,676	
13	126	59	31	0,360	27	26	8	0,302	
14	121	75	22	0,231	91	83	17	0,196	
15	152	109	33	0,256	22	17	8	0,414	
16	116	85	58	0,584	46	16	4	0,147	
17	137	102	24	0,203	112	48	37	0,505	
18	121	82	17	0,171	109	46	31	0,438	
19	165	89	33	0,272	72	39	31	0,585	
20	81	72	31	0,406	56	28	15	0,379	
21	121	60	55	0,645	24	11	10	0,615	
22	92	63	37	0,486	44	29	15	0,420	
23	105	66	46	0,553	231	133	40	0,228	
24	84	54	8	0,119	50	35	15	0,359	
25	123	68	30	0,328	19	13	7	0,445	
Sf médio				0,360	Sf médio				0,355
Desvio Padrão				0,167	Desvio Padrão				0,140

Tabela A.3 - Fator de forma estimado para sedimento do reservatório da PCH de Salto do Paraopeba.

partículas	la	lb	lc	
1	460	223	180	0,562
2	264	111	94	0,549
3	151	141	47	0,322
4	193	144	140	0,840
5	286	139	87	0,436
6	333	319	143	0,439
7	464	288	198	0,542
8	282	242	186	0,712
9	338	318	224	0,683
10	495	200	172	0,547
11	794	418	337	0,585
12	427	313	234	0,640
13	434	280	193	0,554
14	729	428	272	0,487
15	165	123	76	0,533
16	216	170	126	0,658
17	201	75	69	0,562
18	303	210	176	0,698
19	442	338	175	0,453
20	347	183	171	0,679
21	493	342	339	0,826
22	347	329	250	0,740
23	255	133	49	0,266
24	237	147	95	0,509
25	293	100	85	0,497
Sf médio				0,573
Desvio Padrão				0,139