

THIAGO FONSECA DINIZ

**ANÁLISE DE ALGUMAS CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE REJEITOS
DISPOSTOS NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO VISANDO ALTERNATIVAS DE
REUSO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques

VIÇOSA - MINAS GERAIS

2023

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

D585a
2023
Diniz, Thiago Fonseca, 1994-
Análise de algumas características geotécnicas de rejeitos
dispostos no Quadrilátero Ferrífero visando alternativas de reuso
/ Thiago Fonseca Diniz. – Viçosa, MG, 2023.
1 dissertação eletrônica (117 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.

Orientador: Eduardo Antônio Gomes Marques.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2023.

Referências bibliográficas: f. 109-113.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.018>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Ferro - Minas e mineração. 2. Barragens de rejeitos.
3. Resíduos industriais - Reaproveitamento. 4. Quadrilátero
Ferrífero. I. Marques, Eduardo Antônio Gomes, 1965-
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
III. Título.

CDD 22. ed. 627.8

THIAGO FONSECA DINIZ


**ANÁLISE DE ALGUMAS CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE REJEITOS
DISPOSTOS NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO VISANDO ALTERNATIVAS DE
REUSO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.


Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques

APROVADA: 27/10/2023

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **THIAGO FONSECA DINIZ**
Data: 22/01/2024 19:12:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Thiago Fonseca Diniz
Autor(a)

Documento assinado digitalmente
 **EDUARDO ANTONIO GOMES MARQUES**
Data: 23/01/2024 09:12:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eduardo Antonio Gomes Marques
Orientador(a)

AGRADECIMENTOS

À Deus por toda força e discernimento que me deu em todos os momentos, ensinando que tudo acontece no tempo correto, mesmo que muitas vezes não conseguimos compreender seus planos.

Ao professor Dr. Eduardo Marques, por toda paciência, dedicação e contribuições que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Sem dúvidas tem grande parte na minha vida acadêmica e profissional.

Aos meus pais, por todo amor e dedicação na minha vida. Por todo esforço que fizeram para que eu realizasse meus sonhos, desde os deveres de casa até as orações nos momentos de distância. Não consigo imaginar pais melhores no mundo.

Ao meu irmão, pelos ensinamentos e exemplos na vida. Desde os caminhos abertos no mundo da educação até os livros de mineração emprestados.

À minha esposa, Isabella, por todo apoio, dedicação, amor e companheirismo nestes anos. Todo o exemplo de perseverança e dedicação me inspiraram no caminho que trilhei até o momento. Não tenho palavras suficientes para te agradecer.

À minha família por toda dedicação, me auxiliando a ser melhor todos os dias, sempre apoiando e contribuindo. Em especial aos meus avós que não estão mais presentes neste plano, mas sei que se orgulhariam desta conquista.

Aos professores do CEFET-MG que me iniciaram no mundo das pesquisas, em especial a Lupi, Geraldo Damasceno, Marielle Hoalle e Thiago Bortone. Vocês são inspiração de dedicação à pesquisa.

Aos meus amigos pelos incentivos e apoio nos momentos de dificuldade, em especial a Laís pela ajuda no desenvolvimento do trabalho, conversas e revisões na pesquisa.

Aos professores e funcionários do PPGEC da UFV que contribuíram na minha formação acadêmica e profissional através do ensino.

A todos que me ajudaram de alguma forma. Muito obrigado.

RESUMO

DINIZ, Thiago Fonseca, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2023. **Análise de algumas características geotécnicas de rejeitos dispostos no Quadrilátero Ferrífero visando alternativas de reuso.** Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques.

O estado de Minas Gerais possui parte significativa das reservas minerais do Brasil concentrada em uma região de 14 cidades, no Quadrilátero Ferrífero. Devido à importância do beneficiamento de ferro para a economia do Brasil, a região tem se deparado com a necessidade de produzir a partir de lavras de menor teor mineral e com restrição de áreas para disposição de rejeitos, visto a exaustão da capacidade das estruturas existentes e dificuldades legislativas de alteamentos e construção de novas barragens. Assim, a caracterização dos materiais contidos em estruturas auxilia na tomada de decisões para a continuidade das produções e aumento da segurança. O presente estudo buscou, através de publicações da literatura, realizar uma caracterização dos rejeitos do Quadrilátero Ferrífero coletados em diferentes etapas do processo de beneficiamento (espessamento, filtragem e após a disposição) e diferentes metodologias de disposição. As análises mineralógicas apresentaram hematita e quartzo em todas as amostras além de goethita em grande parte destas, fato que é esperado pela região de exploração ter características semelhantes. As análises químicas demonstraram percentual de ferro alto para barragens de Vargem Grande e Forquilha II apresentando teor de 59% e 54% aproximadamente. Em comparação com os resultados de teor de ferro dos rejeitos obtidos após o espessamento, os rejeitos coletados em estruturas apresentaram em média menor teor, o que pode ser explicado pela segregação que ocorre nas praias de deposição onde o material de maior densidade (ferro) tende a ser encontrado em regiões inferiores. Os resultados de granulometria apresentaram maior variabilidade para os rejeitos oriundos de barragens que recebem rejeito total, e as estruturas de empilhamento drenado (aterro hidráulico) apresentaram padrão mais definido, assim como os rejeitos filtrados direcionados para empilhamento, fato explicado pela necessidade de controle deste aspecto nos materiais dispostos, uma das condições para segurança da estrutura. Com relação à reutilização de material para beneficiamento são necessárias análises de composição química por faixa granulométrica identificando a presença de material de teor adequado em granulometrias que permitem beneficiamento nos processos de cada usina, o que, pelos resultados apresentados, representa boa oportunidade para alguns empreendimentos. O reemprego de rejeito como material na construção civil pode ser uma oportunidade de redução do passivo ambiental e aumento de capital, sendo necessário um tratamento prévio das faixas granulométricas desse material.

ABSTRACT

DINIZ, Thiago Fonseca, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, october, 2023. **Analysis of some geotechnical characteristics of tailings disposed in the Quadrilátero Ferrífero aiming at reuse alternatives.** Adviser: Eduardo Antonio Gomes Marques.

The state of Minas Gerais has a significant part of Brazil's mineral reserves concentrated in a region of 14 cities, the Quadrilátero Ferrífero. Due to the importance of iron processing for the Brazilian economy, the region has been faced with the need to produce from mines with lower mineral content and with restricted areas for the disposal of tailings, given the exhaustion of the capacity of existing structures and legislative difficulties of heightening and construction of new dams. Thus, the characterization of materials contained in structures helps in decision-making for the continuity of production and increased safety. The present study sought, through publications in the literature, to characterize the waste from the Quadrilátero Ferrífero in different stages of the beneficiation process (thickening, filtering and after disposal) and different disposal methodologies. Mineralogical analyzes showed hematite and quartz in all samples, in addition to goethite in most of them, a fact that is expected by the exploration region to have similar characteristics. Chemical analyzes showed a high percentage of iron for the Vagem Grande and Forquilha II dams, with a content of approximately 59% and 54%. Compared to the results of the iron content of the tailings obtained after thickening, the tailings collected in structures had a lower iron content on average, which can be explained by the segregation that occurs on the deposition beaches where the material of greater density (iron) tends to be found in lower regions. The granulometry results showed greater variability for the tailings from dams that receive total tailings, and the drained stacking structures (hydraulic landfill) showed a more defined pattern, as well as the filtered tailings directed to stacking, a fact explained by the need to control this aspect in the disposed materials, one of the conditions for the safety of the structure. Regarding the reuse of material for processing, analyzes of chemical composition by granulometric range are necessary, identifying the presence of material with adequate content in granulometries that allow processing in the processes of each plant, which, according to the results presented, represents a good opportunity for some enterprises. The reuse of tailings as material in civil construction can be an opportunity to reduce environmental liabilities and increase capital, requiring prior treatment of the granulometric ranges of this material.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Gráfico comparativo produção e arrecadação do minério de ferro 3T21 X 3T22 13	
Figura 1.2 - Principais reservas minerais do Brasil destacando a concentração no Quadrilátero Ferrífero	15
Figura 1.3 - Comparativo da situação das barragens do Brasil e barragens de Minas Gerais..	16
Figura 5.1 - Espessador de lamas da mina de Brucutu	25
Figura 5.2 - Métodos de alteamento de barragens (a) Alteamento a montante; (b) Alteamento linha de centro; (c) Alteamento a jusante	27
Figura 5.3 - Classificação dos rejeitos quanto a sua forma de disposição	29
Figura 5.4 - Divisão de zonas do empilhamento de rejeito filtrado	30
Figura 5.5 - Espigotamento de rejeito	30
Figura 5.6 - Barragem Casa de Pedra e sua proximidade com a cidade de Congonhas.....	31
Figura 5.7 - Filtro de rejeito a vácuo - Samarco	35
Figura 6.1 - Barragem Fundão e seus diques.....	63
Figura 7.1 - Caracterização mineralógica rejeitos do Quadrilátero Ferrífero.....	82
Figura 7.2 - Diferença da composição química entre rejeitos oriundos do processo de beneficiamento de rochas distintas	82
Figura 7.3 - Composição química dos rejeitos amostrados a partir do espessador de lamas..	84
Figura 7.4 - Composição química dos rejeitos amostrados com base em coletas na praia de rejeitos	84
Figura 7.5 - Caracterização granulométrica média dos rejeitos do Quadrilátero Ferrífero	91
Figura 7.6 - Comparativo de granulometrias espessador de lamas e barragem	94
Figura 7.7 - Caracterização granulométrica rejeito filtrado e alteamentos de maciços constituídos de rejeito	96
Figura 7.8 - Análise granulométrica das faixas ótimas e utilizáveis de agregados miúdos conforme NBR 7211:2022 com as médias de granulometria obtidas	102
Figura 7.9 - Análise granulométrica das faixas ótimas e utilizáveis de agregados miúdos conforme NBR 7211:2022 comparado a rejeitos de estruturas.....	103

LISTA DE TABELA

Tabela 1.1 - Produção bruta e produção beneficiada de minerais em toneladas	14
Tabela 1.2 - Produção bruta e produção beneficiada de minério de ferro em Minas Gerais ...	15
Tabela 6.1 - Curva granulométrica rejeito de underflow - mina de Alegria - extração de Itabirito	37
Tabela 6.2 - Curva granulométrica rejeito de underflow - mina de Alegria - extração de Hematita	38
Tabela 6.3 - Caracterização química rejeito de underflow - mina de Alegria - extração de Hematita e Itabirito.....	38
Tabela 6.4 - Curva granulométrica rejeito do underflow - mina de Fábrica Nova.....	39
Tabela 6.5 - Análise química do rejeito da mina de Fábrica Nova	40
Tabela 6.6 - Granulometria do rejeito do underflow – Mina de Brucutu.....	41
Tabela 6.7 - Caracterização química rejeito de underflow - Mina de Brucutu	41
Tabela 6.8 - Granulometria do rejeito de underflow – mina de Cauê	42
Tabela 6.9 - Caracterização química rejeito de underflow - Mina de Cauê	42
Tabela 6.10 - Granulometria do rejeito de underflow – Mina de Conceição	43
Tabela 6.11 - Caracterização química rejeito de underflow - Mina de Conceição	43
Tabela 6.12 - Análise química de rejeito coletado em barragem – Estudo de Ferrante (2014)	44
Tabela 6.13 - Análise granulométrica de rejeito coletado em barragem - Estudo de Ferrante (2014)	45
Tabela 6.14 - Análise granulométrica rejeitos coletados em barragens – Estudo de Andrade (2014)	48
Tabela 6.15 - Análise química rejeitos coletados em barragens – Estudo de Andrade (2014)	49
Tabela 6.16 - Caracterização granulométrica rejeito do processo de jigagem – Complexo Serra Sul.....	50
Tabela 6.17 - Caracterização granulométrica rejeito após moagem e seleção <1,4 mm – Complexo Serra Sul	51
Tabela 6.18 - Caracterização química rejeito do processo de jigagem - Complexo Serra Sul.	51
Tabela 6.19 - Caracterização química rejeito de barragem - Forquilha II.....	52
Tabela 6.20 - Curva granulométrica rejeito da barragem - Forquilha II	53
Tabela 6.21 - Caracterização física do rejeito da barragem Forquilha II	53
Tabela 6.22 - Caracterização química do rejeito da barragem Forquilha III.....	54
Tabela 6.23 - Curva granulométrica rejeito da praia - Forquilha III	55

Tabela 6.24 - Caracterização física do rejeito da barragem Forquilha III.....	56
Tabela 6.25 - Caracterização química do rejeito da barragem Campo Grande.....	56
Tabela 6.26 - Curva granulométrica rejeito do maciço - Campo Grande.....	57
Tabela 6.27 - Caracterização física do rejeito da barragem Campo Grande.....	57
Tabela 6.28 - Caracterização química do rejeito da barragem Doutor.....	58
Tabela 6.29 - Curva granulométrica barragem Doutor.....	59
Tabela 6.30 - Caracterização física do rejeito da barragem Doutor.....	60
Tabela 6.31 - Caracterização química do rejeito da barragem Itabiruçu.....	61
Tabela 6.32 - Curva granulométrica barragem Itabiruçu.....	61
Tabela 6.33 - Caracterização física do rejeito da barragem Itabiruçu.....	62
Tabela 6.34 - Caracterização física rejeito amostrado da praia – Barragem Fundão.....	64
Tabela 6.35 - Caracterização química rejeito amostrado da praia - Barragem Fundão.....	64
Tabela 6.36 - Classificação granulométrica amostrado polpa da flotação – Barragem Fundão.....	65
Tabela 6.37 - Classificação granulométrica amostrado da praia – Barragem Fundão.....	66
Tabela 6.38 - Caracterização índices físicos amostra da praia de rejeitos - Barragem Fundão.....	68
Tabela 6.39 - Caracterização química amostra da praia de rejeitos – Cava Germano.....	69
Tabela 6.40 - Curva granulométrica amostra da praia de rejeitos – Cava Germano.....	69
Tabela 6.41 - Caracterização física amostra da praia de rejeitos – Cava Germano.....	70
Tabela 6.42 - Massa específica dos grãos e teor de ferro - Amostras referentes ao ESDH - Empilhamento Drenado Monjolo.....	71
Tabela 6.43 - Massa específica dos grãos e teor de ferro - Amostras coletadas em campo - Empilhamento Drenado Monjolo.....	72
Tabela 6.44 - Curva granulométrica - Amostras referentes ao ESDH - Empilhamento Drenado Monjolo.....	73
Tabela 6.45 - Curva granulométrica – Amostras coletadas em campo – Empilhamento Drenado Monjolo.....	75
Tabela 6.46 - Índice de vazos máximo e mínimo - Amostras referentes ao ESDH - Empilhamento Drenado Monjolo.....	75
Tabela 6.47 - Índice de vazos máximo e mínimo - Amostras coletadas em campo - Empilhamento Drenado Monjolo.....	76
Tabela 6.48 - Caracterização física amostras da praia de rejeitos - Empilhamento Drenado Monjolo.....	77

Tabela 6.49 - Caracterização granulométrica rejeito filtrado antes e depois dos ensaios triaxiais - Estudo Carneiro (2021)	78
Tabela 6.50 - Caracterização granulométrica rejeito filtrado antes e depois dos testes proctor - Estudo Carneiro (2021)	79
Tabela 7.1 - Diferença da composição química entre rejeitos a diferentes distâncias na praia em relação ao ponto de lançamento.....	83
Tabela 7.2 - Caracterização granulométrica dos rejeitos de underflow do Quadrilátero Ferrífero	85
Tabela 7.3 - Caracterização granulométrica dos rejeitos contidos em barragens do Quadrilátero Ferrífero	86
Tabela 7.4 - Caracterização granulométrica dos rejeitos arenosos do Quadrilátero Ferrífero ..	88
Tabela 7.5 - Caracterização granulométrica dos rejeitos de um empilhamento drenado no Quadrilátero Ferrífero.....	89
Tabela 7.6 - Caracterização granulométrica dos rejeitos filtrado no Quadrilátero Ferrífero ...	90
Tabela 7.7 - Caracterização física rejeito filtrado e alteamentos de maciços constituídos de rejeito de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero.....	92
Tabela 7.8 - Comparativo de composição química espessador de lamas e barragem.....	95
Tabela 7.9 - Caracterização física rejeito filtrado e alteamentos de maciços constituídos de rejeito	97
Tabela 7.10 - Composição química rejeitos reaproveitados em estudos e rejeitos apresentados no trabalho	99
Tabela 7.11 - Caracterização granulométrica rejeitos reaproveitados em estudos e rejeitos apresentados no trabalho	99
Tabela 7.12 - Limite superior e inferior de granulometria do agregado miúdo conforme ABNT NBR 7211:2022.....	101
Tabela 7.13 - Módulo de finura para utilização de material como agregado miúdo conforme ABNT NBR 7211:2022	101
Tabela 7.14 - Módulo de finura conforme NBR 7211:2022 com as médias de granulometria obtidas para cada tipo de estrutura	103
Tabela 7.15 - Módulo de finura conforme NBR 7211:2022 rejeitos de estruturas	103
Tabela 7.16 - Quantidade de rejeito com possibilidade de reaproveitamento como agregado miúdo.....	104

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANM – Agência Nacional de Mineração

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

DPA – Dano Potencial Associado

ESDH – Ensaio de Simulação de Deposição Hidráulica

ESG – Environmental, Social and Governance

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente

GISTM – Global Industry Standard On Tailings Management

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

ICP – Plasma por acoplamento indutivo

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NA – Não Aplicável

PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragem

PPC – Perda por calcinação

ppm – Partes por milhão

SIGBM – Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração

TSM – Towards Sustainable Mining

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. ESTADO DA ARTE DA CARACTERIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.....	19
3. OBJETIVOS DA PESQUISA.....	22
4. METODOLOGIA	23
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
5.1. Rejeitos da mineração	24
5.2. Disposição de rejeitos	26
5.3. Rejeitos dispostos em barragem	30
5.4. Empilhamento drenado de rejeito – Aterro hidráulico	32
5.5. Empilhamento de rejeito filtrado	34
6. REJEITOS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	36
6.1. Rejeito da mina de Alegria	36
6.2. Rejeito mina de Fábrica Nova	38
6.3. Rejeito da mina de Brucutu	40
6.4. Rejeito da mina de Cauê	41
6.5. Rejeito da mina de Conceição	42
6.6. Rejeito do Quadrilátero Ferrífero sem identificação do empreendimento.....	44
6.7. Rejeitos do complexo Itabirito e barragem da bacia do córrego Vargem Grande.....	46
6.8. Rejeito Complexo Serra Sul	50
6.9. Rejeito barragem Forquilha II.....	52
6.10. Rejeito barragem Forquilha III.....	54
6.11. Rejeito barragem Campo Grande.....	56
6.12. Rejeito barragem Córrego do Doutor.....	57
6.13. Rejeito barragem Itabiruçu.....	60

6.14.	Rejeito Barragem Fundão.....	62
6.15.	Cava do Germano.....	68
6.16.	Empilhamento drenado Monjolo.....	70
6.17.	Rejeito Filtrado sem descrição do empreendimento	77
7.	RESULTADOS.....	81
7.1.	Caracterização mineralógica e química dos rejeitos do Quadrilátero Ferrífero	81
7.2.	Caracterização granulométrica dos rejeitos do Quadrilátero Ferrífero.....	85
7.3.	Caracterização física dos rejeitos do Quadrilátero Ferrífero	92
7.4.	Comparativo de características dos rejeitos caracterizados após o espessador de lamas e contidos em barragens.....	93
7.5.	Caracterização material de alteamento de maciço utilizando rejeito e rejeitos filtrados para empilhamento.....	96
7.6.	Reprocessamento de rejeito para obtenção de minério de ferro concentrado.....	98
7.7.	Utilização do rejeito de beneficiamento de minério de ferro na construção civil ...	100
8.	CONCLUSÕES.....	106
9.	REFERÊNCIAS.....	109
	ANEXO A – Análise granulométrica e módulo de finura da adequação de rejeitos para aproveitamento como agregado.....	114

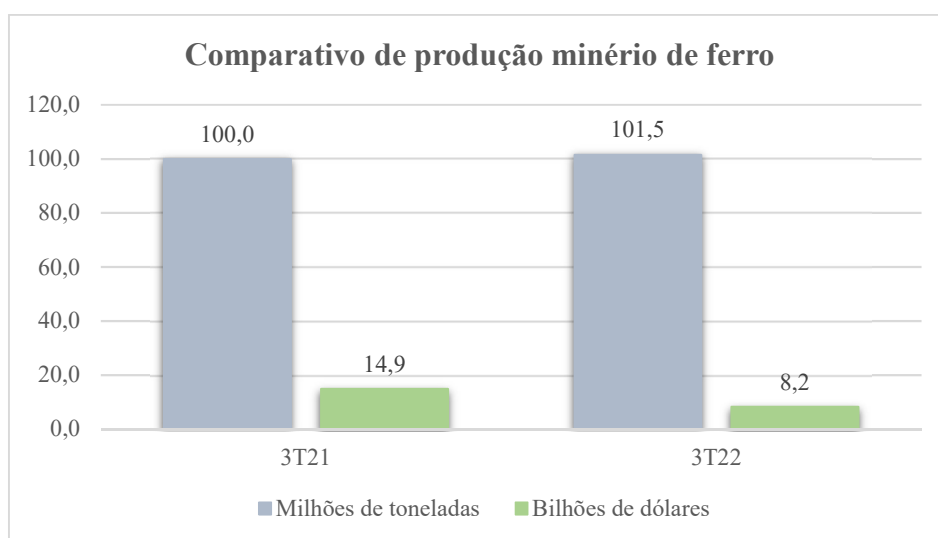
1. INTRODUÇÃO

Apesar da crise mundial ocorrida pela pandemia da Covid-19, a mineração no Brasil apresentou crescimento nos valores obtidos durante o período inicial da doença, corroborando com a ideia de que a mesma é de grande importância para o crescimento do país. Comparando os primeiros trimestres do ano de 2020 (período em que não havia restrições de deslocamento devido à pandemia) e 2021, houve um aumento dos valores de exportação mineral de 73,74%. Além disso, o saldo de empregos gerados pela indústria mineradora saiu de 174.648 pessoas em janeiro de 2020 para 186.610 empregados em março de 2021 (IBRAM, 2021).

Dados publicados pelo IBRAM (2022) demonstra que o setor mineral foi responsável por 40% do saldo comercial brasileiro no ano de 2022 e o faturamento do setor chegou a 250 bilhões de dólares, alcançando mais de 204 mil empregos diretos. Os principais minérios produzidos por participação no faturamento são ferro, ouro e cobre representando, somados, 77,1% da produção.

Como citado anteriormente, o minério de ferro é o mineral com maior participação nos valores referentes ao faturamento do setor, representando sozinho 61,4% deste. O faturamento do setor é influenciado diretamente pelo preço pago pelo mineral, que tem grande variação. É possível observar, na Figura 1.1, que as exportações de minério de ferro aumentaram em 1,5% comparados ao último trimestre de 2021, porém, a arrecadação comparando os mesmos períodos reduziu 44,97% (IBRAM, 2022b).

Figura 1.1 - Gráfico comparativo produção e arrecadação do minério de ferro 3T21 X 3T22



Fonte: Adaptado de IBRAM (2022b)

Associado à importância econômica deste produto e ao aumento da produção, cada vez mais são necessárias à exploração de áreas com menores teores de minério e, conseqüentemente, necessita-se de maiores áreas para disposição de estéreis e rejeitos (subprodutos da produção mineral) (PAIXÃO; WILKEN, 2021). A Tabela 1.1 apresenta dados referentes à produção bruta e beneficiada dos principais minerais produzidos no Brasil em 2021, na qual se pode observar que, dentre os minerais com maior relevância econômica para o país nos últimos anos, o minério de ferro é o que possui melhor aproveitamento da produção bruta.

Tabela 1.1 - Produção bruta e produção beneficiada de minerais em toneladas

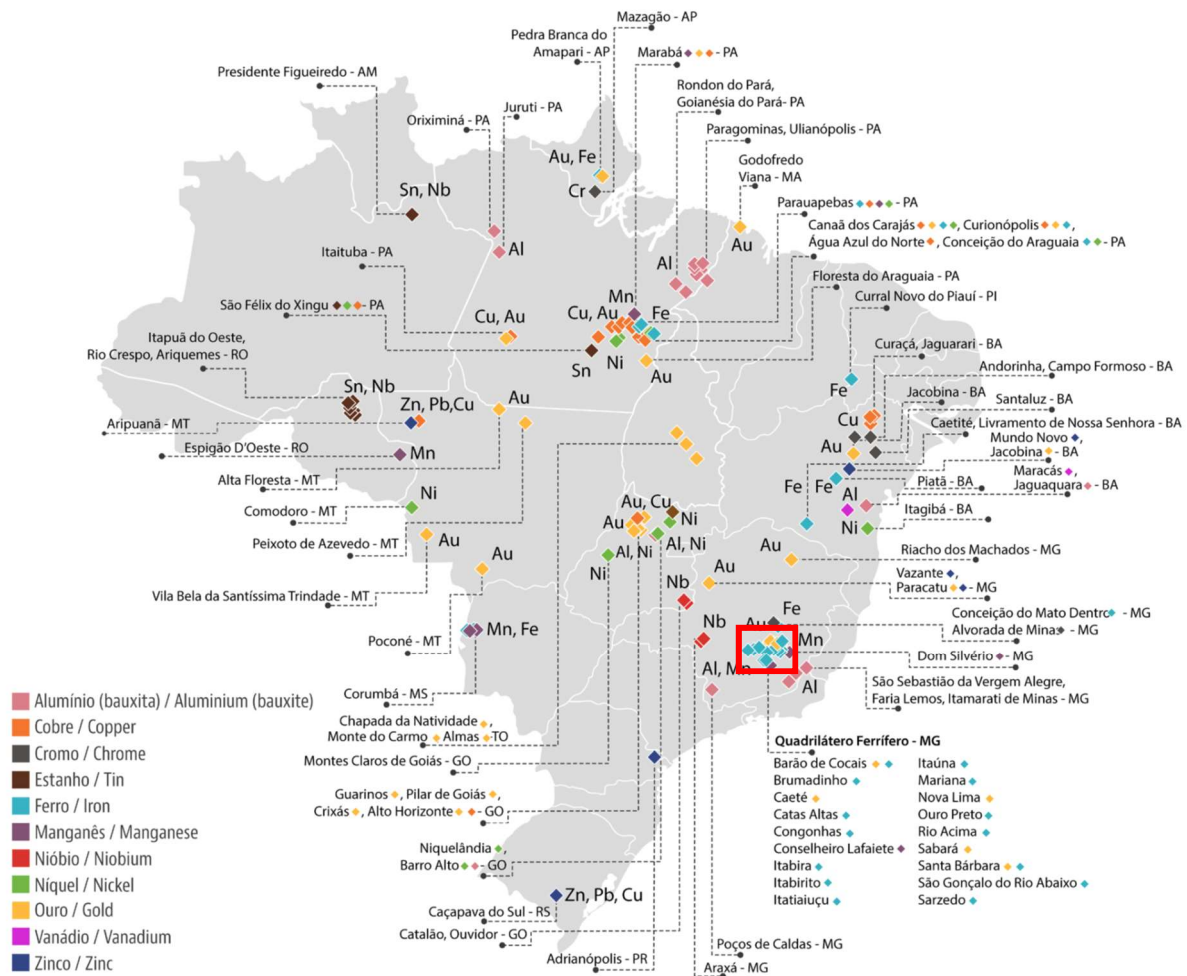
Mineral	Produção bruta t	Teor Mineral %	Produção beneficiada t	Teor Mineral %	Aproveitamento %
Ferro	567.770.006	54,60	430.550.725	63,37	75,83
Ouro	77.711.602	0,00009	62,22	97,51	0,00008
Cobre	99.573.449	0,53	1.152.696	39,52	1,16
Alumínio	46.319.730	45,11	33.364.875	48,63	72,03
Níquel	12.448.552	0,96	342.268	22,20	2,75

Fonte: Adaptado de ANM (2023)

Apesar do bom aproveitamento relacionado à produção bruta do minério de ferro, a redução do valor apresentado na Figura 1.1 exige o aumento de produção para viabilizar empreendimentos da mineração de ferro. Com isso, estruturas de contenção de rejeitos cada vez mais seguras são necessárias para suprir as demandas de produção.

O estado de Minas Gerais é responsável por grande parte da produção de minério de ferro no Brasil. A concentração destas reservas localiza-se na região denominada Quadrilátero Ferrífero que conta com 14 cidades, conforme destacado na Figura 1.2.

Figura 1.2 - Principais reservas minerais do Brasil destacando a concentração no Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Adaptado de ANM (2023)

Por ser um dos grandes produtores de minério de ferro, o estado de Minas Gerais necessita de estruturas de contenção de rejeitos robustas com capacidade para atender a produção da região. Na Tabela 1.2 é possível observar o aproveitamento do beneficiamento do minério de ferro no estado no ano de 2021, conforme publicado pela ANM.

Tabela 1.2 - Produção bruta e produção beneficiada de minério de ferro em Minas Gerais

Produção bruta	Teor Mineral	Produção beneficiada	Teor Mineral	Aproveitamento
t	%	t	%	%
363.345.759	48,89	225.176.637	61,92	61,97

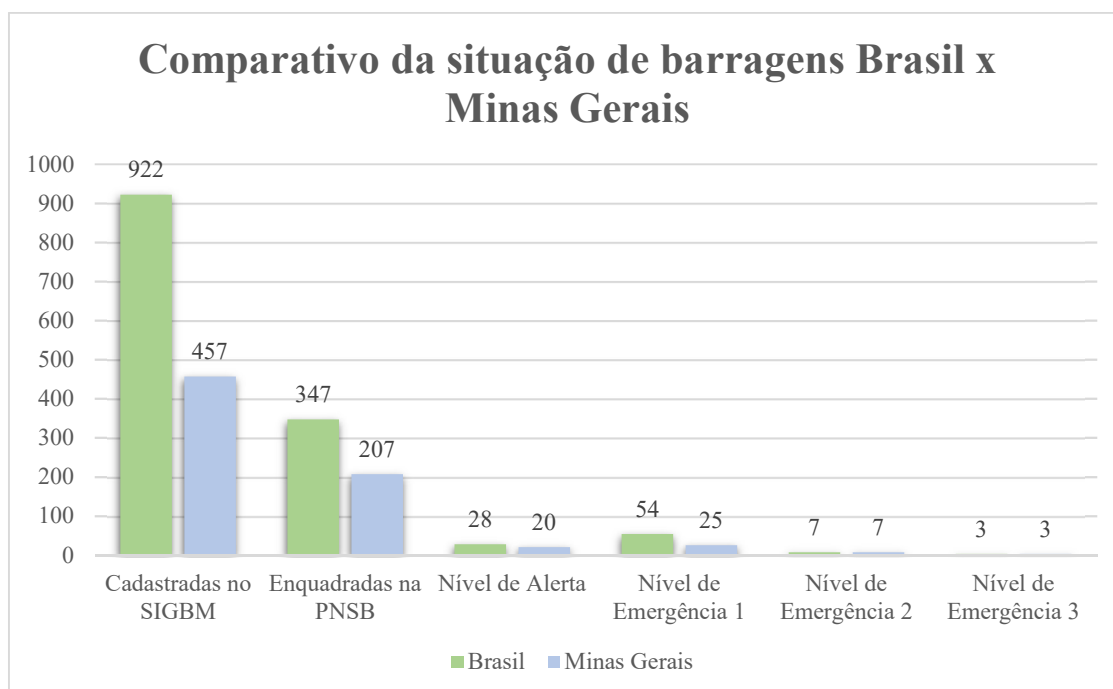
Fonte: Adaptado de ANM (2023)

Em comparação com a produção total do Brasil apresentada na Tabela 1.1, é possível observar que o minério produzido em Minas Gerais gera uma maior quantidade de subprodutos no processo de beneficiamento do minério, possuindo um aproveitamento médio da produção bruta em torno de 14% abaixo da média nacional.

Assim como na produção de minério de ferro, Minas Gerais tem destaque no beneficiamento de zinco e ouro no cenário nacional conforme publicação da ANM (2023), sendo responsável por 94,98% e 52,80% da produção nacional respectivamente.

O fato desta grande concentração de processos de beneficiamento mineral no estado, resulta em uma alta quantidade de estruturas para contenção de rejeitos. Conforme dados publicados no boletim informativo da ANM, o Brasil possui 922 barragens cadastradas no Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM) e destas, 457 se enquadram na Política Nacional de Segurança de Barragem (PNSB), o que representa 49,57%. Observando somente o estado de Minas Gerais, existem 347 barragens cadastradas no SIGBM e destas, 207 se enquadram na PNSB, o que representa 59,65% das barragens do estado. A Figura 1.3 retrata um comparativo das estruturas do estado em relação ao país.

Figura 1.3 - Comparativo da situação das barragens do Brasil e barragens de Minas Gerais



Fonte: Adaptado de ANM (2023b)

Conforme apresentado no comparativo, as estruturas com nível máximo de emergência do Brasil estão situadas em Minas Gerais e mais especificamente no Quadrilátero Ferrífero, localizadas nas cidades de Ouro Preto, Barão de Cocais e Itatiaiuçu. Os níveis de emergência têm sua classificação conforme resolução 95 da ANM, sendo sua última atualização em 2022.

Associado à necessidade econômica da continuidade do beneficiamento mineral está o estado de conservação e manutenção das estruturas existentes, que exigem condições adequadas de segurança, além da identificação das melhores formas de disposição dos subprodutos de beneficiamento do minério de ferro.

Neste aspecto algumas diretrizes internacionais como o TSM (Towards Sustainable Mining) e GISTM (Global Industry Standard On Tailings Management) auxiliam na tomada de decisão para a gestão de rejeitos.

O TSM é um programa desenvolvido pela Associação de Mineração do Canadá (Mining Association Of Canada), voltado para o gerenciamento dos riscos sociais e ambientais. Sua gestão ocorre baseado em atendimento a protocolos que são divididos entre “Comunidades e Pessoas” e “Meio Ambiente e Mudanças Climáticas”, sendo estes itens subdivididos em alguns grupos. O programa trata dentro da gestão de rejeitos a busca por uma gestão economicamente viável, ambientalmente sustentável e que gere segurança para as comunidades que possam ser impactadas pelas estruturas dos empreendimentos.

Assim como a metodologia TSM, o GISTM busca no padrão para o gerenciamento de rejeitos a gestão de riscos focada em evitar danos ambientais e sociais. O documento é dividido em tópicos que tratam assuntos como base de conhecimento, projetos e obrigação de monitoramento da estrutura desde sua fase de construção até o pós-fechamento e necessidade de clareza e divulgação pública a respeito das estruturas de rejeito.

Outro ponto importante para a continuidade da mineração é a adequação a sistemas sustentáveis. Movimentos como ESG (Environmental, Social and Governance) e economia circular ressaltam a importância do aspecto ambiental e social no sistema produtivo de uma empresa, tanto para possíveis investidores quanto para bom relacionamento com a sociedade impactada, fato relevante no Quadrilátero Ferrífero devido a proximidade de seus empreendimentos com centros urbanos.

Além da importância nos aspectos produtivos, o conhecimento do material contido em estruturas é parte fundamental no plano de fechamento dos empreendimentos. Para a definição

da reintegração da área ao ambiente, é preciso entender o comportamento do fluxo de água pelo rejeito, comportamento geoquímico do material e os tratamentos necessários para revegetação da área (MASSIGNAN; SÁNCHEZ, 2022).

Neste contexto, o intuito deste trabalho é avaliar algumas características geotécnicas de rejeitos do Quadrilátero Ferrífero dispostos em barragens, empilhamentos drenados e empilhamentos de rejeito filtrado, bem como identificar a variabilidade dos materiais contidos nestas estruturas e entre as metodologias, pontos que configuram dificuldades para a descaracterização das estruturas além de possíveis oportunidades de reutilização e reemprego destes materiais baseado nos conceitos da economia circular. A pesquisa visou caracterizar o estado da arte dos rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero ferrífero, com foco em pesquisa bibliográfica.

2. ESTADO DA ARTE DA CARACTERIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

A importância da produção mineral para o Brasil associado às leis rígidas com relação à disposição de rejeito fez com que os empreendimentos mineradores começassem a desenvolver novos métodos de disposição. Este cenário, impactado pelas tragédias recentes associadas ao rompimento de barragens com alteamento a montante, compõe, além da necessidade da execução de novas técnicas de empilhamento, a descaracterização de estruturas consideradas com baixa segurança.

Estudos a respeito das barragens tem crescido conforme demonstrado no estudo de Pereira e Medina (2021) que realizaram uma revisão sistemática dos temas abordados relacionados às barragens. Segundo o estudo, os assuntos mais publicados se referem aos processos químicos da atividade mineradora, monitoramento ambiental, preocupações com a poluição e biorremediação. Apesar da importância destes temas, o cenário atual das barragens e da disposição de minérios carece de conhecimento científico relacionado aos rejeitos e suas formas de disposição, uma vez que as técnicas abordadas ainda são baseadas em conhecimentos empíricos e experiências de campo. Cabe destacar o crescente aumento de publicações a respeito do tema desde o ano de 2010.

Presotti (2002) estudou as influências da variação do teor de ferro na resistência, compacidade e granulometria de amostras de rejeitos obtidas do empilhamento drenado Monjolo, na mina de Água Limpa. O autor caracterizou amostras obtidas a diferentes distâncias do ponto de lançamento de rejeito através do ensaio de simulação de deposição hidráulica (ESDH). Para a análise de resistência, o autor realizou ensaios triaxiais drenados destas amostras com variações no teor de ferro, obtendo resultados de maiores ângulos de atrito para os maiores percentuais de ferro nas amostras.

Também com pesquisa realizada com o empilhamento drenado Monjolo, Santos (2004) avaliou a influência do teor de ferro e características dos grãos do rejeito arenoso na condutividade hidráulica do aterro, caracterizando amostras obtidas através de ESDH e coletas em campo. Além dos ensaios de condutividade hidráulica em laboratório, o trabalho demonstra resultados dos ensaios de infiltração em campo. Foi identificado, como esperado, que os valores de condutividade hidráulica são maiores para amostras com maior índice de vazios. Para a variação de teor de ferro, a tendência é de redução da condutividade com o aumento do teor de ferro. Com os resultados obtidos, o autor demonstrou uma tendência de aumento da condutividade

hidráulica com relação à distância da área de lançamento, demonstrando que, para o rejeito analisado, a condutividade hidráulica é diretamente influenciada pelo peso específico das partículas sendo que, as partículas de maior peso tendem a se depositar próximo à área de lançamento, e as de menor peso específico tendem a se espalhar pela praia.

O rejeito contido na barragem Fundão (estrutura com alteamento pelo método a montante) que sofreu ruptura em 2015, foi estudado por Rezende (2013), no qual foram realizadas as caracterizações da estrutura no processo construtivo e operacional, com intuito de fazer análises numéricas a respeito do comportamento da estrutura em relação aos recalques, interações de estruturas, posicionamento de linha freática e outros fatores. Em seu estudo a autora cita a importância de grande controle tecnológico neste tipo de estrutura que, apesar de atrativa financeiramente, necessita de controles na construção e operação para garantia da segurança.

Com o intuito de avaliar a suscetibilidade à liquefação por carregamento estático em estruturas de contenção de rejeito granular, Pereira (2005) realizou estudos em 6 estruturas de rejeitos do beneficiamento de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero. O autor cita a preocupação da ocorrência deste fenômeno em materiais com baixa densidade, como o caso dos rejeitos gerados nos processos de obtenção do minério de ferro concentrado, mesmo em áreas assísmicas. Para a elaboração do trabalho o autor coletou amostras deformadas a 1 e 20 m de distância do ponto de lançamento de rejeito das estruturas. Em seus estudos, o autor cita através dos ensaios realizados que não existe uma influência direta entre o potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro e as curvas granulométricas e características mineralógicas, identificando que o fator fundamental para esta avaliação é a compactação do material pela interferência direta no arranjo das partículas.

Silva *et al.* (2006) realizaram a caracterização do rejeito oriundo do processo de beneficiamento da mina de Alegria para a verificação da possibilidade de utilização deste como base da revegetação de algumas áreas. Após as análises, os autores identificaram que o material necessitaria de correção em sua composição química para a utilização no plantio de revegetação das áreas.

Realizando uma análise de possibilidade de reaproveitamento através de melhorias nos processos de beneficiamento do rejeito gerado nos processos de extração de minério de ferro, Wolff (2009) realizou análises químicas e físicas de rejeitos oriundos do beneficiamento de 7 usinas de uma mesma mineradora. A autora identificou que principalmente os rejeitos ultrafinos

apresentaram teores de ferro significativos, entre 44% e 64%, maiores que algumas áreas de lavra exploradas.

Com a dificuldade de obtenção de novas áreas para dispor rejeitos e a continua ocupação das estruturas existentes, Andrade (2014) realizou estudos a respeito do rejeito contido em 4 barragens do Quadrilátero Ferrífero, com o objetivo de caracterizar este material quanto sua possibilidade de emprego na construção civil, assim, auxiliando na redução de material disposto nas estruturas e aumento da vida útil da operação das minas.

Assim como Andrade, Ferrante (2014) realizou a caracterização do material contido em uma barragem do Quadrilátero Ferrífero, sem citar a estrutura ou empreendimento, com o objetivo de identificar quais as etapas necessárias para introduzir este material no circuito de beneficiamento novamente, extraíndo o minério de ferro contido nos rejeitos depositados reduzindo o volume de material contido na estrutura e permitindo a continuidade de disposição nesta, sem necessidade de viabilização de novas áreas.

Com os desafios a respeito de novas tecnologias para dispor rejeitos e com a necessidade de estruturas confiáveis e que não gerem tanto impacto a sociedade, Carneiro (2021) desenvolveu seu trabalho realizando a caracterização de rejeito filtrado da produção de uma mineradora do Quadrilátero Ferrífero. O estudo consistiu em caracterização física e geomecânica do material. A caracterização física foi utilizada em uma análise comparativa com outras publicações que caracterizaram rejeitos da mesma região. A realização de ensaios geomecânicos como ensaios de compactação, permitiu a visualização do comportamento do rejeito coletado quando solicitado a diferentes tensões confinantes. Estudos como este são de grande importância para a realização de pilhas com grandes dimensões pois, como citado no trabalho, rejeitos filtrados solicitados a altas tensões confinantes é um tema pouco abordado e com poucas publicações de referência.

3. OBJETIVOS DA PESQUISA

A região do Quadrilátero Ferrífero tem relevante importância econômica na exploração mineral para o Brasil devido à grande concentração de reservas de ferro. Contudo, as mineradoras da região têm o desafio da manutenção de estruturas em nível de emergência existentes, visto que todas as barragens de nível 2 e 3 do país estão localizadas nesta região. Além disso, enfrentam desafios para a implementação de técnicas para disposição, devido à dificuldade de obtenção de novas licenças para implantação de barragens. Esse contexto deixa clara a importância de conhecer os subprodutos gerados no beneficiamento de minério de ferro na região.

Assim, o objetivo principal desta pesquisa é avaliar as características geotécnicas existentes nos rejeitos gerados a partir do beneficiamento de minério de ferro na região do Quadrilátero Ferrífero, para as disposições em barragens, empilhamentos drenados, cavas e empilhamentos de rejeito filtrado. Além deste, os objetivos secundários do trabalho são:

- Avaliar a variabilidade do rejeito gerado a partir da exploração de rochas diferentes;
- Avaliar a diferença do rejeito gerado no processo de beneficiamento (pós espessador de lamas) e o material existente nas estruturas;
- Avaliar a variabilidade das características de rejeitos a diferentes distâncias do ponto de lançamento;
- Avaliar as diferenças dos rejeitos de acordo com o tipo de estrutura de disposição;
- Avaliar as possibilidades de redução dos volumes de rejeito dispostos em estruturas através da reutilização destes no processo de beneficiamento e reemprego na construção civil.

4. METODOLOGIA

A elaboração deste trabalho iniciou com a revisão bibliográfica a respeito dos rejeitos oriundos do beneficiamento de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero, suas diversas formas de disposição e desafios.

Foram selecionados diferentes estudos com caracterizações de materiais em etapas distintas do processo de beneficiamento do ferro, como após espessamento, disposto em praias e após processo de filtragem para identificação das diferenças entre estes métodos. Além disso, foram selecionados estudos que caracterizavam rejeitos com disposição em diferentes estruturas de contenção como barragem, empilhamento drenado e cava.

A seleção das publicações não aplicou limite temporal inferior, restringindo-se apenas à região de origem do rejeito. Com isso, foram utilizadas 10 publicações distintas para obtenção dos dados utilizados neste trabalho.

Após a seleção das publicações foi realizada análise a respeito das semelhanças e diferenças dos materiais, quais os principais fatores de influência na caracterização, as diferenças entre os materiais dispostos em cada tipo de estrutura, diferenças relacionadas a cada etapa do processo, influência do ponto de coleta com relação ao ponto de lançamento de material.

Por último, foi realizada uma análise baseada em estudos publicados para um possível reaproveitamento de material, sendo este o reprocessamento para maior aproveitamento do minério de ferro ou venda do rejeito como material para construção civil.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1. Rejeitos da mineração

O processo de beneficiamento do minério pode ser químico e/ou físico, resultando no minério concentrado (com valor econômico) e rejeito, com isso, podemos definir rejeito como o material que não possui características físicas ou mineralógicas requeridas na produção da planta de beneficiamento para uso como minério. As características deste material irão variar de acordo com o mineral bruto que está em processamento e o tipo de beneficiamento realizado (FERRANTE, 2014).

Além da concentração de material com maior valor econômico, por meio das alterações químicas e físicas, o processo de beneficiamento visa gerar um produto com presença mínima de elementos não desejáveis presentes na lavra explorada, pois um alto teor de sílica, fósforo, alumina e/ou manganês pode causar efeitos indesejados na produção de aço como a alteração na ductibilidade ou torná-lo quebradiço (PEREIRA, 2005; WOLFF, 2009).

O rejeito gerado através do processo de beneficiamento pode ter diferentes destinos como cavas subterrâneas, empilhamentos a seco, empilhamentos drenados ou barragens. A avaliação do melhor método de disposição do rejeito depende não só da disposição de área ou método de armazenamento proposto, como da operacionalidade da planta. (ANDRADE, 2014; FERRANTE, 2014).

Com o aumento da exploração do minério de ferro, áreas com menores teores de ferro passam a ter sua lavra viabilizada, necessitando de maiores áreas para disposição de rejeitos e estéreis. Além disso, cresce a quantidade de estudos de viabilidade de reaproveitamento dos rejeitos contidos em barragens antigas, onde o processo de beneficiamento não era tão eficiente quanto o atual e as lavras eram realizadas em áreas com grande concentração de ferro, resultando em rejeitos com alto teor mineral. (ANDRADE, 2014)

Devido aos tipos de minerais que são lavrados para a obtenção minério de ferro na concentração e granulometria desejada, os minerais mais comuns de se encontrar nos rejeitos são caulinita, goethita, quartzo, magnetita, gibbsita e hematita (WOLFF, 2009).

Conforme estudos realizados apresentados por Andrade (2014), os rejeitos da mineração de ferro tem a tendência de apresentarem em suas composições sílica, óxido de ferro e alumínio, citando que comumente é apresentado um alto percentual de óxidos de ferro nas menores

granulometrias do rejeito e altos percentuais de sílica nas maiores granulometrias, fato que pode ser explicado pelos métodos de concentração, que são limitados para pequenas granulometrias.

A separação dos tipos de rejeito conforme granulometria é de grande importância para compreensão do comportamento deste material nas regiões onde se encontra disposto, interferindo em características como plasticidade e compressibilidade do material. Os rejeitos finos ou “lama” são caracterizados por 90% ou mais de seu material possuir granulometria abaixo dos 0,074 mm de diâmetro equivalente. Este tipo de material, na maioria das vezes, é resultante dos processos de beneficiamento, que envolve flotação em colunas e espessamento, sendo concomitante a produção de rejeitos granulares (PEREIRA, 2005).

O espessador de lamas (Figura 5.1) é um equipamento de grande porte com formato cônico em sua base, tem como função principal a separação de materiais sólidos da água através do adensamento e saída no underflow conforme necessidade dos processos posteriores, sendo alguns destes desaguamentos, bombeamento, filtragem ou condicionamento. Além do adensamento de materiais como função principal, este equipamento permite a reutilização de água nos processos da usina através da captação de água no overflow (CHAVES, 2013).

Figura 5.1 - Espessador de lamas da mina de Brucutu



Fonte: Acervo pessoal

Com isso, os rejeitos caracterizados oriundos do espessador de lamas apresentam a característica do rejeito após o processo de beneficiamento do minério, conforme eficiência da usina diante a frente de lavra que se encontra em operação.

Para um melhor aproveitamento das estruturas de disposição de rejeitos, muitas empresas adotam a disposição distinta para materiais finos e granulares. Em casos como o da barragem Fundão existia um dique formando uma barragem para materiais finos, e uma região para a disposição de materiais mais grosseiros (REZENDE, 2013).

Com a dificuldade de obtenção de licenças para a implantação de novas barragens, algumas empresas têm optado pelo empilhamento de rejeito filtrado para os materiais que atendem às características granulométricas requeridas em projeto, e dispõem em barragens apenas os materiais fora de especificação que não permitem o empilhamento aumentando, assim, a vida útil das estruturas.

Em seu trabalho, Wolff (2009) cita que existem tecnologias para recuperação de materiais com granulometrias acima de 15 μm , o que é comum nas praias de rejeito. Assim, através da concentração de materiais contidos nas praias de rejeito, é possível se obter um material adequado para venda e reduzir a quantidade de rejeito disposta. O autor também cita que não existiam tecnologias para a recuperação de materiais ultrafinos, ou seja, com granulometria abaixo de 10 μm .

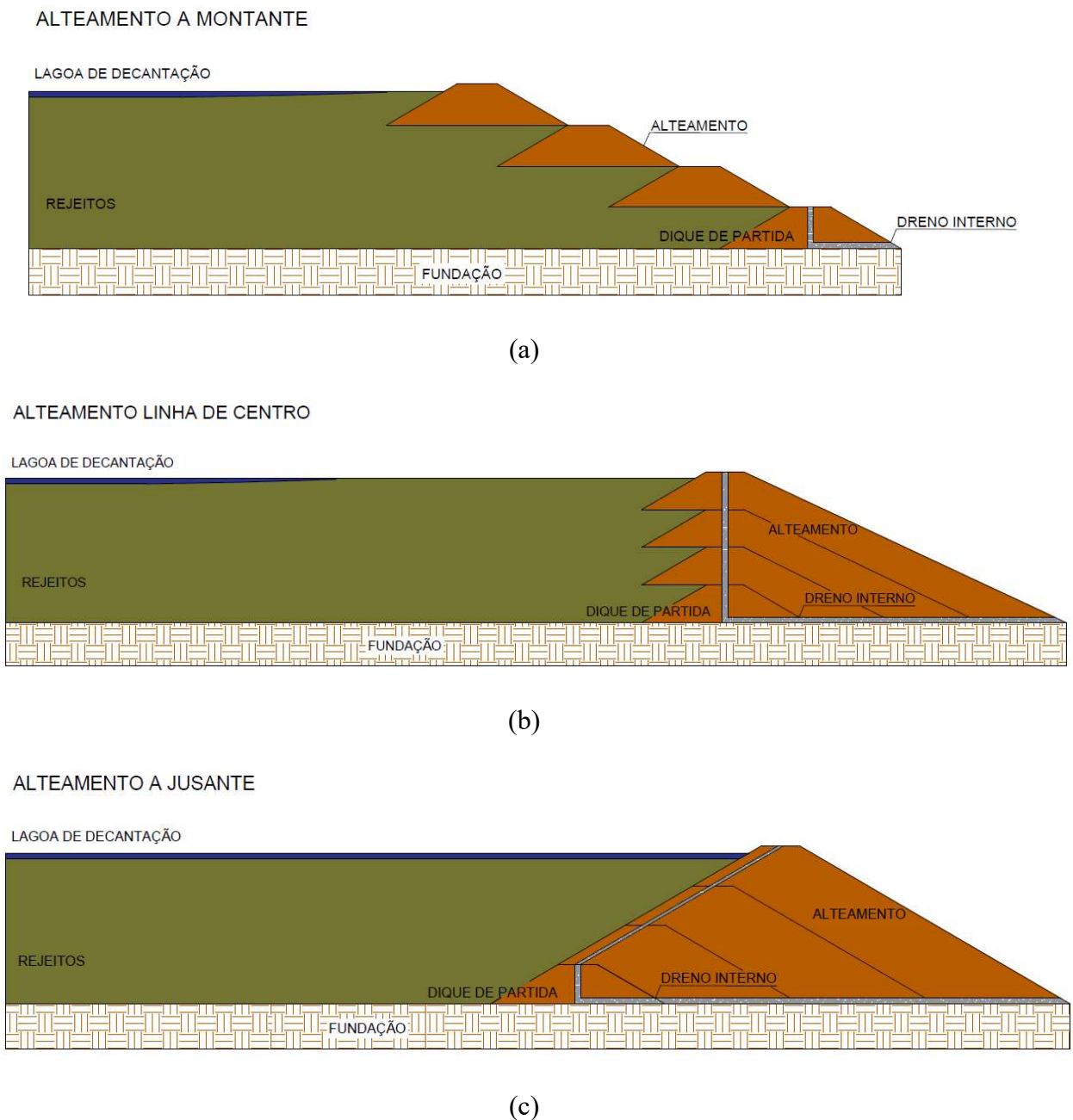
5.2. Disposição de rejeitos

O método mais comum para a disposição de rejeitos é disposição em diques e barragens onde os materiais são transportados por meio de tubulações com alto teor de água, sendo constituídos por apenas 10 a 25% de sólidos (ALVES, 2020; IBRAM, 2016).

Apesar de muito comum nos processos de beneficiamento, este tipo de armazenamento requer grandes áreas e, à medida que aumenta a demanda para o armazenamento de rejeito, os maciços são alteados a partir do dique de partida para aumentar a capacidade do reservatório. A prática de alteamento é realizada também em empilhamentos drenados para o aumento da capacidade de armazenamento de rejeito nas estruturas, mas, também neste caso, esta forma está proibida em Minas Gerais, por ser considerada alteamento a montante.

Os alteamentos são classificados quanto à sua posição em relação ao dique de partida, sendo estes: a montante (que utiliza o próprio rejeito sedimentado como fundação da área alteada), jusante e linha de centro. O alteamento a montante é o mais econômico, pois exige uma menor área em comparação com os outros métodos, além de menor quantidade de material para sua construção, por utilizar parte do rejeito depositado como apoio, conforme pode ser observado através da Figura 5.2.

Figura 5.2 - Métodos de alteamento de barragens (a) Alteamento a montante; (b) Alteamento linha de centro; (c) Alteamento a jusante



Fonte: Adaptado de IBRAM (2016)

Apesar da economia gerada, estruturas que possuem alteamento a montante devem possuir alto controle tecnológico em sua execução e durante a vida útil para que o comportamento do material empregado no maciço esteja de acordo com o projeto elaborado. Estruturas com este tipo de alteamento são mais suscetíveis a problemas em áreas de carregamento dinâmico além de requererem um maior controle da linha freática (PEREIRA, 2005).

Além disso, com a modificação das legislações a respeito de disposição de rejeitos, mesmo com condições naturais propícias (disponibilidade hídrica e condições de relevo favoráveis) à utilização de disposição de rejeito em polpa, resultou em que métodos alternativos de disposição deste material começassem a ser mais estudados e utilizados.

Em Minas Gerais, a lei estadual 23.291/2019 obriga que as estruturas alteadas a montante sejam completamente descaracterizadas com prazo limite até 2027 (para estruturas de pequeno porte o prazo é mais curto). Esta lei foi sancionada após o acidente com a barragem da mina Córrego do Feijão em Brumadinho-MG, que se rompeu em janeiro de 2019, levando à óbito mais de 250 pessoas. Outro acidente de grandes proporções ocorreu em 2015 na barragem Fundão em Mariana-MG, e ambas eram estruturas alteadas a montante, o que explica a lei restritiva a este método construtivo (PAIXÃO; WILKEN, 2021).

Outro desafio para as mineradoras é encontrar novas maneiras de dispor o rejeito gerado, tendo em vista que a legislação existente para a obtenção de licença ambiental destaca que devem ser buscadas alternativas para a disposição de rejeitos que não em barragens (ESTADO DE MINAS GERAIS, 2019).

A forma de disposição de material está ligada diretamente à classificação do rejeito quanto ao teor de sólidos e, conseqüentemente, à tensão de escoamento. Assim, eles são classificados desde rejeitos em polpa até rejeitos filtrados. E, de acordo com a tensão de escoamento do mesmo, pode ser armazenado em barramentos ou disposição em pilhas. A Figura 5.3 ilustra as formas de classificação.

Figura 5.3 - Classificação dos rejeitos quanto a sua forma de disposição

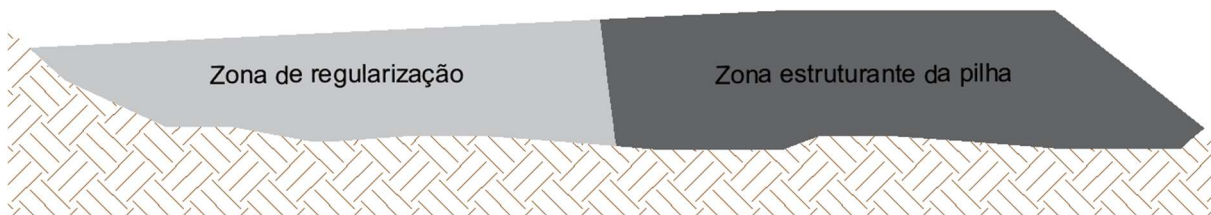


Fonte: Adaptado de MEND (2017)

Como demonstrado acima, os rejeitos depositados com menores taxas de umidade possuem melhores características de resistência, podendo ser empilhados, necessitando assim de uma menor área para deposição. A execução de pilhas de rejeito filtrado possui vários desafios, pois é uma técnica baseada em cálculos empíricos e, como citado por Carneiro (2021), para pilhas maiores que 100 metros devem ser realizados estudos específicos pois os conhecimentos empíricos não são aplicáveis.

Para o método construtivo das pilhas de rejeito filtrado existem áreas distintas entre a zona estruturante da pilha e a área de regularização de umidade. Com o processo de filtragem dos rejeitos é comum que o material chegue à área de empilhamento com umidade diferente do especificado em projeto e assim, necessita de regularização antes de passar pelo processo de compactação na zona estruturante, conforme demonstrado na Figura 5.4 (ALVES, 2020).

Figura 5.4 - Divisão de zonas do empilhamento de rejeito filtrado



Fonte: Adaptado de LUPO; HALL (2010)

5.3. Rejeitos dispostos em barragem

Reconhecida por ser uma das formas mais tradicionais de disposição de rejeitos, a utilização de diques de contenção para a criação de locais seguros de disposição de rejeitos foi a escolha da maioria dos empreendimentos por muitos anos devido aos aspectos econômicos e facilidades operacionais e de manuseio encontradas nas regiões mineradoras para esta forma de disposição.

A escolha pelo método de disposição em barragens se mostra interessante desde a forma de beneficiamento do minério. Grande parte dos processos de beneficiamento de minerais tem como base a adição relevante de água aos sólidos. Com isto, após o processo de beneficiamento o rejeito tende a possuir a forma de poupa, com teores de materiais sólidos variando entre 10 e 25%, com boa mobilidade e baixa resistência ao cisalhamento. A Figura 5.5 apresenta um exemplo de disposição de rejeito em polpa (ALVES, 2020; PEREIRA, 2005).

Figura 5.5 - Espigotamento de rejeito



Fonte: SAFF ENGENHARIA (2021)

Além das vantagens citadas, a utilização de diques e barragens para a contenção de rejeitos permite a disposição de rejeitos totais, sem a necessidade de separação e classificação quanto às características do material.

Apesar das facilidades geológicas, como a existência de vales, comumente encontradas nas regiões de mineração para a construção de menores áreas de maciço e uma grande capacidade de armazenamento de material, aspectos ambientais e de segurança sempre foram condicionantes para a escolha de locais de construções de barragens. Especificamente no Quadrilátero Ferrífero existem muitos empreendimentos minerários que são próximos a centros urbanos, como demonstra a Figura 5.6, o que tem interferência direta nessas escolhas (ALVES, 2020).

Figura 5.6 - Barragem Casa de Pedra e sua proximidade com a cidade de Congonhas



Fonte: Google Earth

Após os acidentes de 2015 (Barragem de Fundão) e 2019 (Barragem B1 da mina Córrego do Feijão), as leis ficaram mais rígidas e restritivas com relação ao licenciamento e formas de monitoramento deste tipo de estrutura. Estruturas que possuem alteamento a montante tem descaracterização obrigatória. Estruturas novas encontram maiores dificuldades em relação ao processo de licenciamento quando comparadas ao período anterior dos acidentes. Sendo assim, priorizadas estruturas de empilhamento de rejeitos ou disposição em cavas com exploração finalizada. Além das dificuldades legais, a ideia de construção de novas barragens não é vista com bons olhos pela sociedade (ALVES, 2020).

Estruturas alteadas a montante eram utilizadas pelo seu baixo valor e rápida execução quando comparado a outros métodos de alteamento. Apesar disso, fatores como susceptibilidade à liquefação, condutividade hidráulica do material do dique e da praia de rejeitos e monitoramento da linha hidráulica na estrutura são elementos críticos para a segurança deste tipo de estrutura (SANTOS, 2004).

A legislação referente a barragens no Brasil se tornou mais rígida também no aspecto de monitoramento das condições de segurança das estruturas. É possível observar que as empresas mineradoras têm investido em projetos de investigação de material presente em maciços e fundações das estruturas para realizar estudos de estabilidade de forma mais assertiva. Outro ponto importante a respeito desta forma de disposição é o Dano Potencial Associado - DPA destas estruturas. Conforme histórico recente de acidentes, os rompimentos de estruturas de barragens de rejeito podem ter consequências catastróficas em algumas regiões (ALVES, 2020).

Como ponto importante para avaliação do comportamento das estruturas de barragens, Rezende (2013) cita que os principais fatores que influenciam no nível d'água e fluxo interno da barragem são distância entre o lago e o maciço, variação de permeabilidade dos materiais empregados no maciço, condições de condutividade hidráulica da fundação, posicionamento do sistema de drenagem interno, condições operacionais da estrutura e regime de fluxo em material saturado.

Além disso, o conhecimento da condutividade hidráulica do material presente na praia de rejeitos permite um dimensionamento de posição do lago e nível d'água adequados para a estrutura assim reduzindo a possibilidade de poropressões e elevação de forças de percolação no maciço, conferindo maior segurança.

5.4. Empilhamento drenado de rejeito – Aterro hidráulico

Assim como na disposição de rejeitos em barragens, na metodologia de empilhamento drenado, também conhecida como aterro hidráulico, o rejeito é direcionado à estrutura por meio de tubulações, sendo estes bombeados ou por meio de gravidade, caso a topografia da região permita. Apesar da semelhança de transporte com as barragens, esta técnica é apropriada para rejeitos granulares com alto teor de permeabilidade, pois a segurança da estrutura depende diretamente de um sistema de drenagem interno eficiente, que garanta o escoamento da água à

medida que as novas camadas de rejeito são depositadas, assegurando assim a produtividade da área (FERRANTE, 2014; SANTOS, 2004).

Para a disposição de material nos aterros podem ser utilizados pontos únicos de lançamento ou linhas, sendo utilizados espigotes ou hidrociclones. A utilização dos hidrociclones é condicionada à necessidade de separação de material conforme granulometria, sendo esta uma prescrição de projeto ou condição de controle para a segurança da estrutura. Conforme estudos publicados, em grande parte das estruturas deste tipo, o lançamento de material na praia era realizado por espigotes sem separação de material (PEREIRA, 2005; SANTOS, 2004).

Com relação a utilização de hidrociclones no processo de disposição de rejeitos, sua função é separação dos materiais, rotacionando um fluxo de água com rejeitos. Assim, os materiais finos tendem a deslocar-se para a parte superior, enquanto os materiais de maior granulometria descem. Com isso, o material que sai da parte superior do equipamento, chamado de overflow, contém uma mistura de material fino e água, formando a lama; e o material que sai da parte inferior contém uma mistura de material granular e água, chamado de underflow. Em minas onde os materiais finos e granulares são dispostos na mesma estrutura, comumente se utiliza o material de underflow próximo ao maciço de contenção, devido às suas características de permeabilidade hidráulica, e a disposição do overflow após as praias de rejeito formadas, ou seja, mais para o fundo do reservatório (SANTOS, 2004).

Apesar de alguns estudos apresentarem a tendência de formação de zonas de materiais com maior peso relativo dos grãos, e faixas granulométricas bem definidas, Rezende (2013) demonstra que essa suposição não é uma verdade absoluta, e através dos resultados de caracterização obtidos, a autora ressalta a importância de uma análise eficaz dos materiais presentes na estrutura para definição assertiva das características e assim melhoria dos controles de segurança.

A caracterização granulométrica, condutividade hidráulica, índice de vazios, compressibilidade de solos, resistência ao cisalhamento e compressão da estrutura e do material contido na praia é de grande importância, pois a liquefação é o modo de falha que tem maior impacto nos aterros hidráulicos, sendo este associado a perda de resistência em solos caracterizados como areia fina, alto índice de vazios e saturados (SANTOS, 2004).

Os empilhamentos drenados alteados seguem as mesmas características das barragens convencionais, podendo ser a montante, jusante ou linha de centro, porém estes alteamentos

utilizam o próprio rejeito arenoso com compactação para alteamento a partir do dique de partida. Este tipo de construção tem pontos atraentes para os empreendimentos, otimizando a utilização da área licenciada para a disposição (REZENDE, 2013; SANTOS, 2004).

Em seu estudo, Santos (2004) retrata que cerca de 60% dos casos de ruptura em empilhamentos drenados estão relacionados a projetos inadequados e falta de controle na construção. Para a segurança deste tipo de estrutura, deve-se ter uma boa caracterização dos materiais do maciço e da praia, além da elaboração de controles efetivos para acompanhamento do comportamento da estrutura, assegurando desta forma a estabilidade (REZENDE, 2013; SANTOS; RIBEIRO, 2007).

5.5. Empilhamento de rejeito filtrado

O empilhamento de rejeito filtrado foi a opção encontrada para minerações onde existiam limitações topográficas para construções de barragens e disposição via gravidade, limitação de recursos hídricos e atividade sísmica frequente (DAVIES, 2011).

Com o aumento do rigor no licenciamento de barragens para mineração, esta alternativa de disposição tem crescido dentre as mineradoras do Brasil que não possuíam limitações físicas impedindo a utilização de outros métodos. O processo de empilhamento de rejeito filtrado apresenta um menor dano associado às estruturas, custo reduzido de monitoramento, de conservação e de impactos ambientais quando comparado a outros métodos (GOMES, R. B.; DE TOMI; ASSIS, 2016).

Alguns custos, como equipamentos específicos para a filtragem de rejeitos, e um transporte direcionado a este subproduto devem entrar no orçamento dos empreendimentos. O sistema de filtragem do rejeito tem influência direta na qualidade e produtividade do empilhamento, e o transporte deste material é realizado por transportadores de correia ou caminhões. Além destes pontos, uma pilha de rejeito filtrado deve ser dimensionada preferencialmente em regiões sem aporte de água, ou, onde esta condição não seja possível, dimensionar drenos que sejam capazes de dissipar a ação do fluxo de águas ou, ainda, evitar a disposição em períodos chuvosos.

Com a necessidade de utilização deste método para disposição dos rejeitos gerados na produção de minério de ferro é necessário o aumento de estudos acerca deste tipo de estrutura, visto que o conhecimento científico para esta forma de disposição é consolidado para pilhas de até 100 metros de altura, baseado em experimentos empíricos e em condições climáticas bastantes

distintas daqueles que ocorrem no Quadrilátero Ferrífero, em que ocorre um período chuvoso em que as precipitações tem intensidade elevada. É importante ressaltar que, para absorver os volumes de rejeito gerados no processo da mineração de ferro, as pilhas de rejeito deverão ter dimensões muito além da base empírica existente (CARNEIRO, 2021; CRYSTAL; EZAMA; HORE, 2018).

Para o sucesso da disposição de empilhamento, o rejeito gerado no processo de beneficiamento do minério deve respeitar as características requeridas no projeto. Os maiores desafios são referentes à granulometria, que está ligada diretamente a área de lavra do material e processo de beneficiamento, e à umidade, que está ligada à eficiência do processo de filtragem, que pode ser a vácuo (Figura 5.7) ou pressão (CRYSTAL; EZAMA; HORE, 2018).

Figura 5.7 - Filtro de rejeito a vácuo - Samarco



Fonte: Website In the mine (2020)

Muitas vezes a disposição de rejeitos em empilhamentos é utilizada de forma conjunta com a disposição em barragens. Alguns empreendimentos utilizam a disposição em barragens para os materiais que saem do especificado no projeto de empilhamento, principalmente relacionado à granulometria. Quando os rejeitos gerados possuem faixa de umidade fora da ótima requerida, é possível realizar o tratamento através de estoque temporário para secagem do material em casos de umidade acima do especificado, umidificação via caminhões pipa ou aspersão em caso de umidade abaixo da requisição de projeto.

6. REJEITOS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Neste capítulo serão apresentados dados sobre rejeitos referentes a algumas estruturas do Quadrilátero Ferrífero, que serão posteriormente discutidos nos resultados deste trabalho.

6.1. Rejeito da mina de Alegria

A mina de Alegria localiza-se no município de Mariana, Minas Gerais com histórico de operação na região deste 1977, possui rochas itabiríticas com variações de teor de ferro, compactidade e aspectos mineralógicos (FREITAS, 2014).

O trabalho desenvolvido por Silva *et al.* (2006) teve como objetivo a caracterização de 3 tipos de estéril e o rejeito produzido na mina de Alegria, para identificação da possibilidade de utilização destes materiais como base de revegetação de pilhas de rejeito da mina. Segundo descrito no trabalho, o rejeito analisado era disposto em pilhas.

É possível identificar através dos resultados de granulometria realizados que o método da pipeta com dispersão em NaOH 0,5 N e agitação mecânica utilizado por Silva *et al.* (2006) não é efetivo para este tipo de material. Conforme citado pelos autores, os resultados de granulometria não fecham o valor de 100% da massa obtida anterior ao início dos experimentos.

Como as análises de areia grossa e areia fina foram realizadas pelo método de peneiramento, é citado pelos autores que a diferença dos resultados obtidos tende a ser resultante da metodologia de análise empregada para os materiais de granulometria mais fina (silte e argila), podendo ser causada pela alta densidade das partículas. Conforme citado, este método foi desenvolvido para caracterização de solos agrícolas, e foi empregada por falta de metodologias específicas para caracterização de rejeitos na época do estudo.

Na caracterização química do material é citado que o rejeito apresentou pH com alto valor, justificado pela utilização de soda cáustica no processamento do minério. Além disso, foi realizada a análise da porcentagem de teor do cálcio, ferro, manganês, zinco, potássio, cobre e chumbo, em que todos apresentaram baixos teores para a realização de plantio, assim, necessitando de ações de correção do material para adequação ao fim analisado.

A caracterização mineralógica do material apresentou a presença de quartzo e hematita em todas as granulometrias, além de pequena quantidade de caulinita nas frações silte e areia.

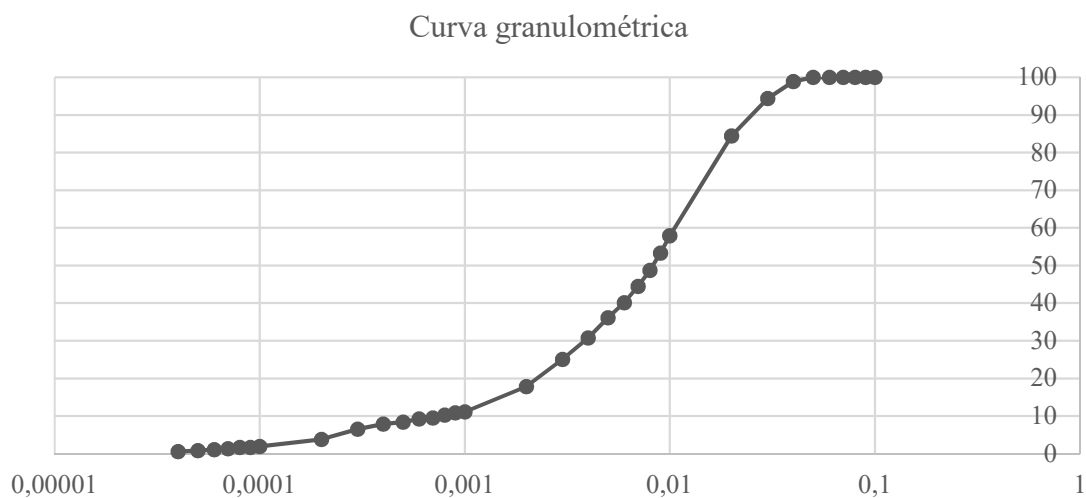
Segundo a conclusão dos autores, é possível que não tenha sido identificada a presença de caulinita na argila devido à baixa presença de material desta granulometria na lâmina de análise.

No trabalho realizado por Wolff (2009) foram realizadas análises químicas e físicas de rejeitos provenientes dos processos de beneficiamento de uma única empresa, dentre esses, foram analisados amostras de rejeito underflow do espessador de lamas da mina de Alegria, sendo parte destas provenientes do beneficiamento de hematita e parte do beneficiamento de itabirito.

Os procedimentos para análise física e química do rejeito, além da validação dos resultados obtidos por Wolff (2009) serão descritas no item 6.2 deste trabalho. As Tabelas Tabela 6.1 e Tabela 6.2 retratam a caracterização granulométrica do material obtido para o rejeito coletado underflow do espessador de lamas.

Tabela 6.1 - Curva granulométrica rejeito de underflow - mina de Alegria - extração de Itabirito

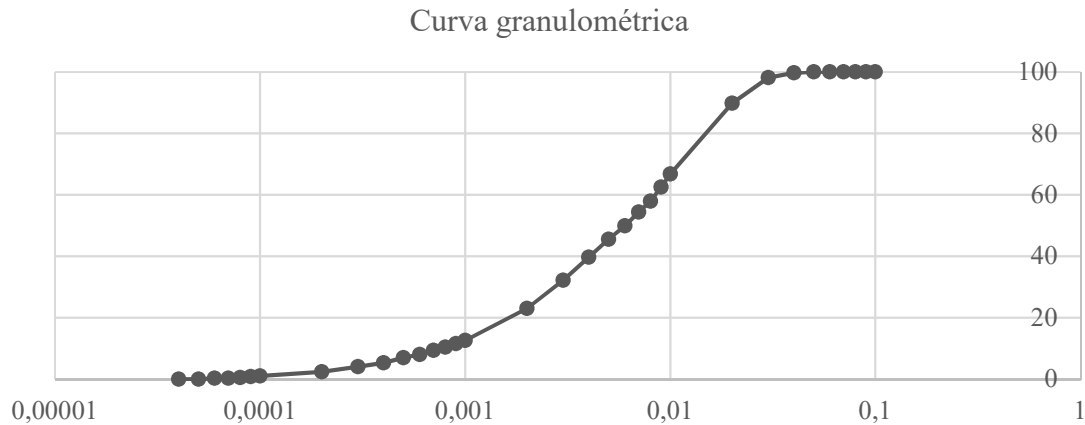
Areia	Silte	Argila
-	82,15%	17,85%



Fonte: Adaptado de Wolff (2009)

Tabela 6.2 - Curva granulométrica rejeito de underflow - mina de Alegria - extração de Hematita

Areia	Silte	Argila
-	76,94%	23,06%



Fonte: Adaptado de Wolff (2009)

Para as amostras obtidas da extração de Hematita e Itabirito foram identificados como principais minerais presentes no rejeito: Hematita (Fe_2O_3), Goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), Quartzo (SiO_2), Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH}_3)$) e Moscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$). Com relação à caracterização química do material realizada pela autora pode-se observar os resultados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Caracterização química rejeito de underflow - mina de Alegria - extração de Hematita e Itabirito.

Amostra	Fe (%)	Al (%)	Mn (%)	P (%)	Ca ppm	K ppm	Mg ppm	Ti ppm
Extração de hematita	51,8	2,4	0,2	0,21	594	91	460	671
Extração de itabirito	48,6	1,2	0,4	0,17	1061	161	496	315

Fonte: Adaptado de Wolff (2009)

6.2. Rejeito mina de Fábrica Nova

O trabalho desenvolvido por Wolff (2009) também apresenta a caracterização física e química de rejeitos da mina de Fábrica Nova, localizada no município de Mariana, MG. Assim como nas amostras analisadas da mina de Alegria, a autora utilizou amostras underflow do espessador de lamas para análise. Ambas as minas estão inseridas no complexo Mariana, que também

engloba as minas de Timbopeba e Fazendão. Conforme descreve a autora, o material explorado na mina tem teor de ferro médio de 43,8%.

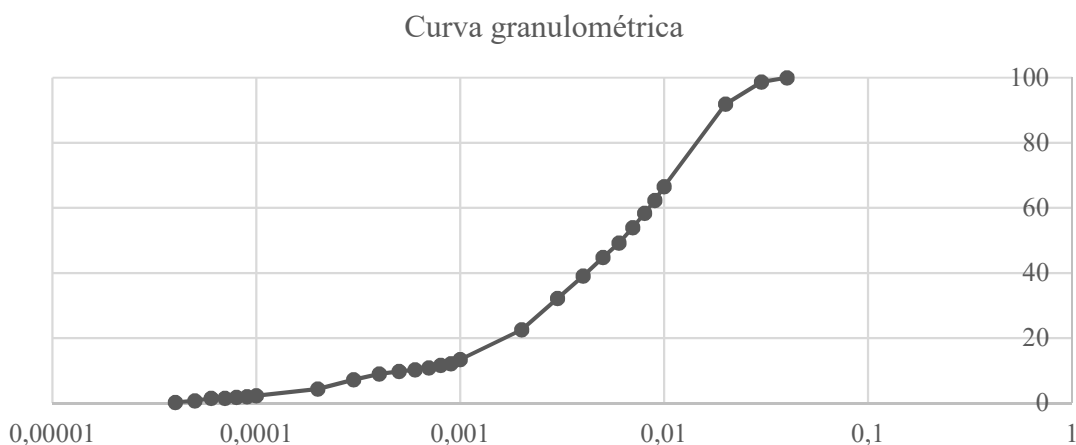
Para as análises químicas Wolff (2009) fez um comparativo de resultados entre diferentes amostras obtidas através das mesmas condições para identificar variabilidade nos resultados obtidos pelo método ICP (plasma por acoplamento indutivo) obtendo uma variação da ordem de 1%. Além disso, a autora realizou testes de classificação química comparando as amostras secas e amostras em polpa, obtendo variação da caracterização da ordem de 2%. Para a análise granulométrica também foi realizado um comparativo entre os resultados obtidos para análises de polpa e análise de material seco e, segundo a autora, a diferença foi de 4% para as frações menores que 9 μm .

Para as análises granulométricas a autora cita o ensaio realizado através de peneiramento a seco para a amostra da Mina Brucutu (uma das minas cujo rejeito proveniente do espessador foi analisado no estudo), cujo resultado apresentou apenas 7% de material composto por partículas menores que 10 μm . Com base neste resultado a autora identificou que o método não é adequado para análise pois o resultado esperado era que a porcentagem de partículas finas fosse a maior parte do material, o que foi confirmado através da análise granulométrica realizada no granulômetro a laser.

Os resultados apresentados na Tabela 6.4 correspondem à análise realizada por meio de granulometria a laser.

Tabela 6.4 - Curva granulométrica rejeito do underflow - mina de Fábrica Nova

Areia	Silte	Argila
-	77,47%	22,53%



Fonte: Adaptado de Wolff (2009)

Para a caracterização mineralógica foi utilizada a difração de raios-X, sendo os principais minerais encontrados para a amostra de Fábrica Nova: Hematita (Fe_2O_3), Goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), Quartzo (SiO_2), Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH}_3)$) e Moscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$).

A análise química do material foi realizada por meio da espectroscopia de plasma em amostras globais e em pares e, conforme descrito no trabalho de Wolff (2009), o erro relativo obtido entre as análises foi em torno de 1%. Os resultados obtidos no estudo para a mina de Fábrica Nova podem ser observados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Análise química do rejeito da mina de Fábrica Nova

Amostra	Fe (%)	Al (%)	Mn (%)	P (%)	Ca ppm	K ppm	Mg ppm	Ti ppm
Fabrica Nova	53,4	1,1	0,3	0,17	531	112	309	221

Fonte: Adaptado de Wolff (2009)

6.3. Rejeito da mina de Brucutu

Dentre os rejeitos analisados no trabalho de Wolff (2009), se encontram as análises dos rejeitos de underflow do espessador de lamas da mina de Brucutu, conforme formas de ensaio citados no item 6.2 deste trabalho.

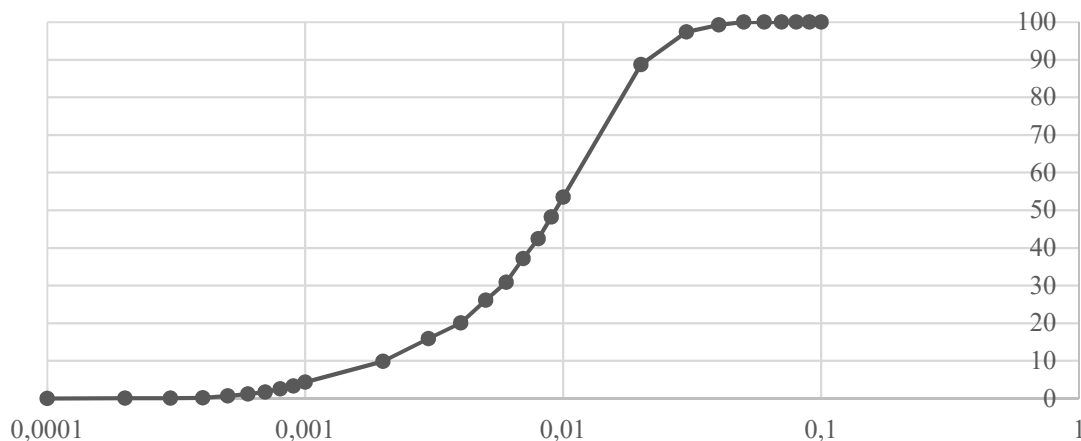
A Mina de Brucutu, localizada no município de São Gonçalo do Rio Abaixo-MG, teve início de suas operações como complexo usina/mina no ano de 2006, sendo à época, o maior empreendimento no mundo deste tipo em capacidade inicial de produção. Atualmente a mina conta com 3 barragens para disposição de rejeitos: Sul (Córrego do Canal), Norte/Laranjeiras e Torto, a última ainda em fase de comissionamento para início das operações (ANM, 2023c; SPINOLA *et al.*, 2009).

Para a caracterização física foi realizada a análise por meio de granulômetro a laser, e o resultado obtido pela autora pode ser observado através da Tabela 6.6.

Tabela 6.6 - Granulometria do rejeito do underflow – Mina de Brucutu

Areia	Silte	Argila
-	90,15%	9,85%

Curva granulométrica



Fonte: Adaptado de Wolff (2009)

Durante o processo de caracterização mineralógica na difração de raios-x, a autora relatou que os principais minerais encontrados no rejeito foram: Hematita (Fe_2O_3), Goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), Quartzo (SiO_2), Moscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$) e Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$). A caracterização química realizada por meio da espectroscopia de plasma pode ser observada na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 - Caracterização química rejeito de underflow - Mina de Brucutu

Amostra	Fe (%)	Al (%)	Mn (%)	P (%)	Ca ppm	K ppm	Mg ppm	Ti ppm
Brucutu	44,8	3,1	0,2	0,16	333	94	121	674

Fonte: Adaptado de Wolff (2009)

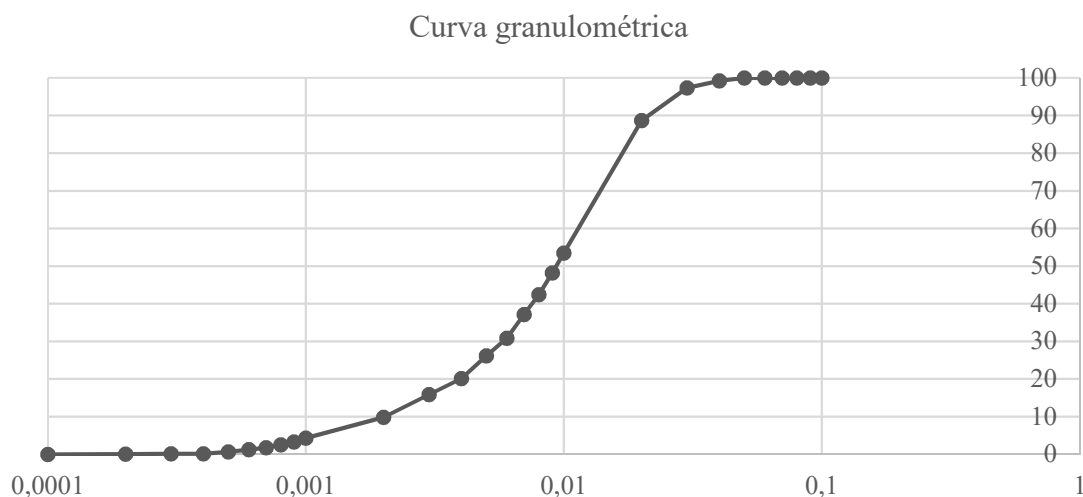
6.4. Rejeito da mina de Cauê

A análise do rejeito da mina de Cauê, localizada no município de Itabira – MG, também pode ser observado no trabalho desenvolvido por Wolff (2009). Os resultados de caracterização física, mineralógica e química foram obtidos através dos métodos descritos no item 6.2 deste trabalho.

Para a caracterização física foi realizada a análise por meio do granulômetro a laser, e os resultados obtidos pela autora podem ser observados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 - Granulometria do rejeito de underflow – mina de Cauê

Areia	Silte	Argila
-	92,68%	7,32%



Fonte: Adaptado de Wolff (2009)

Durante o processo de caracterização mineralógica na difração de raios-x, a autora relatou que os principais minerais encontrados no rejeito foram: Hematita (Fe_2O_3), Goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), Quartzo (SiO_2), Talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e Moscovita ($\text{KA}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$). A caracterização química realizada por meio da espectroscopia de plasma pode ser observada através da Tabela 6.9.

Tabela 6.9 - Caracterização química rejeito de underflow - Mina de Cauê

Amostra	Fe (%)	Al (%)	Mn (%)	P (%)	Ca ppm	K ppm	Mg ppm	Ti ppm
Cauê	45,6	1,1	2,1	0,12	584	568	715	288

Fonte: Adaptado de Wolff (2009)

6.5. Rejeito da mina de Conceição

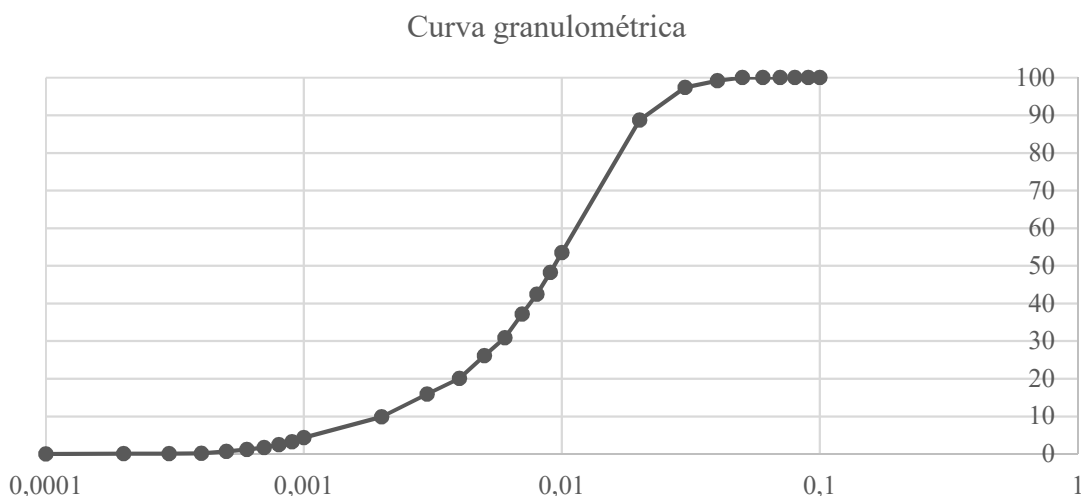
Outro rejeito analisado por Wolff (2009) foi o rejeito oriundo dos processos de beneficiamento da mina de Conceição, localizada no município de Itabira – MG. Os resultados de

caracterização física, mineralógica e química foram obtidos por meio dos métodos descritos no item 6.2 deste trabalho.

Para a caracterização física foi realizada a análise através do granulômetro a laser, e os resultados obtidos pela autora podem ser observados através da Tabela 6.10.

Tabela 6.10 - Granulometria do rejeito de underflow – Mina de Conceição

Areia	Silte	Argila
-	92,68%	7,32%



Fonte: Adaptado de Wolff (2009)

Durante o processo de caracterização mineralógica na difração de raios-x, a autora relatou que os principais minerais encontrados no rejeito foram: Hematita (Fe_2O_3), Goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), Quartzo (SiO_2), Talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) e Moscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$). A caracterização química realizada através da espectroscopia de plasma pode ser observada através da Tabela 6.11.

Tabela 6.11 - Caracterização química rejeito de underflow - Mina de Conceição

Amostra	Fe (%)	Al (%)	Mn (%)	P (%)	Ca ppm	K ppm	Mg ppm	Ti ppm
Conceição	44,3	1	1,9	0,11	458	231	419	247

Fonte: Adaptado de Wolff (2009)

6.6. Rejeito do Quadrilátero Ferrífero sem identificação do empreendimento

No estudo desenvolvido por Ferrante (2014), foi realizado um estudo de viabilidade econômica de recuperação de rejeitos de uma mina situada no Quadrilátero Ferrífero, sem citar a estrutura ou empreendimento.

Para a realização da avaliação foram realizadas análises químicas e físicas do material, que era retirado da barragem e disposto em pilhas intermediárias para secagem antes de retornar ao processo de separação e concentração do material. É importante ressaltar que a análise realizada pela autora levou em consideração apenas os aspectos importantes para a avaliação do seu trabalho, ou seja, foram caracterizados na análise química apenas os elementos que possuem informações importantes e a faixa granulométrica que indica a qual processo deverá ser direcionado o material (britagem primária ou concentração magnética).

Durante a análise química foi analisada a presença apenas dos elementos ferro, dióxido de silício, alumínio, fósforo, manganês e a perda por calcinação. Segundo demonstrado no estudo, os materiais retidos na peneira de 1,4 mm retornaram à fase de britagem primária devido ao seu alto teor de ferro, como pode ser observado na Tabela 6.12:

Tabela 6.12 - Análise química de rejeito coletado em barragem – Estudo de Ferrante (2014)

Análise granulométrica		Fe	SiO₂	Al	Mn	PPC (Perda por calcinação)
Amostra 1	Global	41,63	36,7	1,75	0,16	2,22
	> 1,4 mm	60,76	6,35	2,9	0,2	3,91
	< 1,4 mm	44,62	33,2	0,52	0,19	2,63
Amostra 2	Global	40,01	39,04	1,66	0,21	2,14
	> 1,4 mm	61,44	5,62	2,58	0,20	3,35
	< 1,4 mm	39,88	39,35	1,18	0,19	1,80
Amostra 3	Global	40,68	37,88	1,57	0,14	2,13
	> 1,4 mm	61,66	5,88	2,98	0,15	3,15
	< 1,4 mm	39,67	39,50	1,15	0,09	2,13

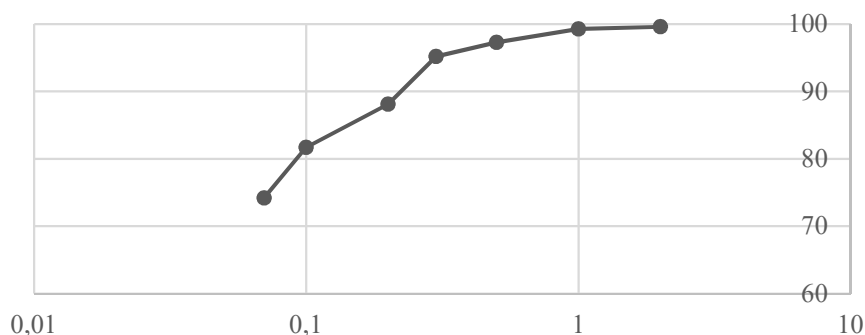
Fonte: Adaptado de Ferrante (2014)

A Tabela 6.13 traz a análise granulométrica das 3 amostras, conforme apresentado no estudo de caso. O processo de peneiramento foi realizado em laboratório por peneiramento a úmido através de peneiras mecânicas suspensas e, com base nos resultados apresentados, pode-se observar que o material mantém um padrão de granulometria fina.

Tabela 6.13 - Análise granulométrica de rejeito coletado em barragem - Estudo de Ferrante (2014)

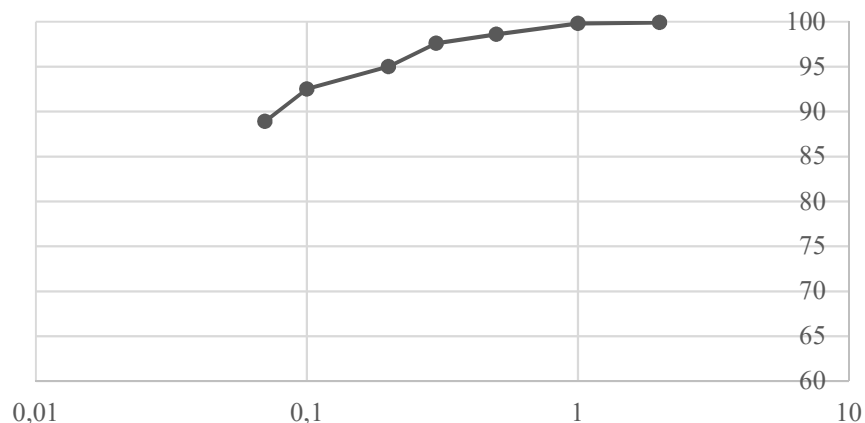
Amostra	Classificação ABNT	Malha	Massa	% Retida	% Retida acumulada	% Passante acumulada
Amostra 1	Areia Grossa	2,0	30	0,4	0,4	99,6
	Areia Grossa	1,4	25	0,3	0,7	99,3
	Areia Média	0,500	160	2,0	2,7	97,3
	Areia Média	0,300	175	2,2	4,8	95,2
	Areia Fina	0,150	570	7,0	11,9	88,1
	Areia Fina	0,106	525	6,5	18,3	81,7
	Areia Fina	0,075	600	7,4	25,8	74,2
	Silte + Argila	Passante	6010	74,2	100,0	0,0
TOTAL(g)			8095			

Curva granulométrica

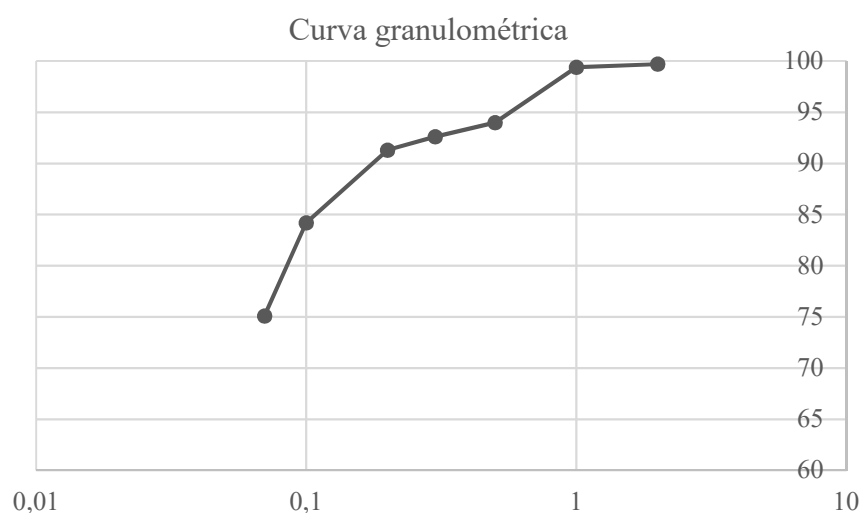


Amostra 2	Areia Grossa	2,0	10	0,1	0,1	99,9
	Areia Grossa	1,4	10	0,1	0,2	99,8
	Areia Média	0,500	95	1,1	1,4	98,6
	Areia Média	0,300	85	1,0	2,4	97,6
	Areia Fina	0,150	215	2,6	5,0	95,0
	Areia Fina	0,106	210	2,5	7,5	92,5
	Areia Fina	0,075	300	3,6	11,1	88,9
	Silte + Argila	Passante	7395	88,9	100,0	0,0
TOTAL(g)			8320			

Curva granulométrica



Amostra 3	Areia Grossa	2,0	25	0,3	0,3	99,7
	Areia Grossa	1,4	25	0,3	0,6	99,4
	Areia Média	0,500	460	5,4	6,0	94,0
	Areia Média	0,300	115	1,4	7,4	92,6
	Areia Fina	0,150	110	1,3	8,7	91,3
	Areia Fina	0,106	600	7,1	15,8	84,2
	Areia Fina	0,075	770	9,1	24,9	75,1
	Silte + Argila	Passante	6360	75,1	100,0	0,0
TOTAL(g)		8465				



Fonte: Adaptado de Ferrante (2014)

6.7. Rejeitos do complexo Itabirito e barragem da bacia do córrego Vargem Grande

Andrade (2014) apresentou a caracterização de rejeitos de 4 barragens do Quadrilátero Ferrífero pertencentes a uma única empresa. A escolha das barragens foi realizada de acordo com o potencial de risco associado a cada uma das estruturas e o impacto econômico que a recuperação de parte deste material poderia ter para cada uma destas, para isso, foram analisados documentos da empresa proprietária e da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM).

O objetivo do estudo desenvolvido era a análise do potencial de utilização dos materiais dispostos nas barragens como materiais da construção civil, podendo ser utilizado na fabricação de cerâmicas, pavimentação asfáltica, material agregado no concreto, entre outros.

Dentre as barragens estudadas, Andrade (2014) cita que 3 destas pertencem ao complexo Itabirito (próximo às cidades de Belo Horizonte, Conselheiro Lafaiete, Ouro Preto, Itabirito e Mariana), localizando-se próximo à bacia do rio das Velhas e os rejeitos dispostos nestas 3 barragens são oriundos do beneficiamento de itabirito para obtenção do minério de ferro, sendo

que esta rocha apresenta teor de ferro médio de aproximadamente 50%. Segundo citado no estudo estas barragens tiveram início de operação em 1978, 1988 e 1999, respectivamente, e a liberação da área ocupada pelas praias de rejeito tem grande importância econômica para a continuidade do negócio na região, visto que há grande dificuldade para obtenção de novas áreas para disposição de estéril e rejeito.

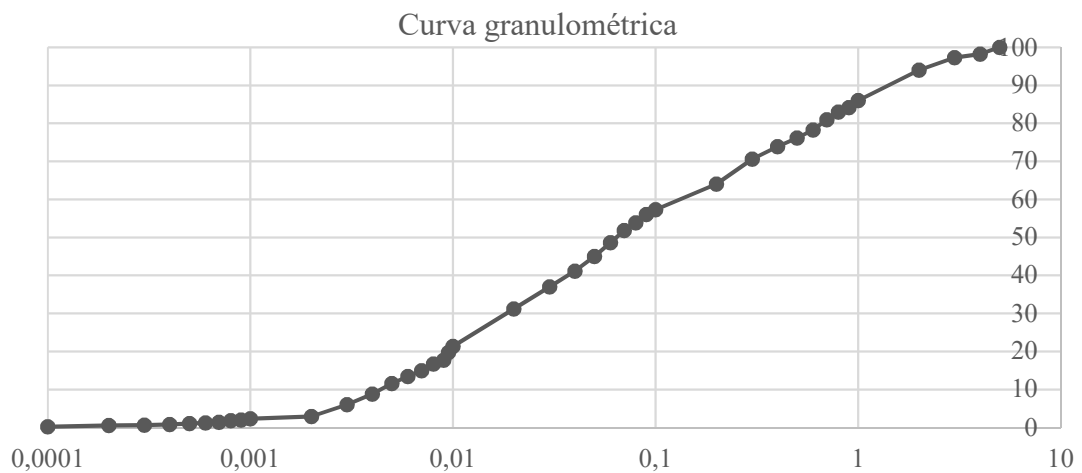
A quarta barragem do estudo apresentada está localizada na bacia do córrego Vargem Grande, próximo aos municípios de Ouro Preto, Itabirito e região metropolitana de Belo Horizonte. Segundo Andrade (2014), o rejeito presente nesta barragem é oriundo do processo de beneficiamento de hematita, que apresenta teor de ferro médio aproximado de 60%. Segundo estudo, a empresa realiza a retirada de parte do rejeito existente na estrutura para recuperação de finos do minério. Assim como as 3 barragens estudadas do complexo Itabirito, a liberação de área na barragem existente na bacia do córrego Vargem Grande tem grande importância na continuidade do empreendimento, que já possui limitação de área para disposição de rejeitos.

É possível observar que as curvas de distribuição granulométrica dos rejeitos analisados são semelhantes, o que pode ser explicado pelo processo de beneficiamento pelo qual o minério passa, sendo todos os rejeitos oriundos de processos de moagem, separação física e magnética. Além disso, Andrade (2014) cita que a maior quantidade de partículas de menor granulometria presentes na barragem localizada na bacia do córrego Vargem Grande pode ser explicada por ser uma barragem mais recente, e assim os materiais finos ainda encontram-se na parte superior da praia, e pelo fato dos rejeitos serem oriundos do processo de beneficiamento de hematita, que apresenta material de granulometria menor quando comparado ao itabirito.

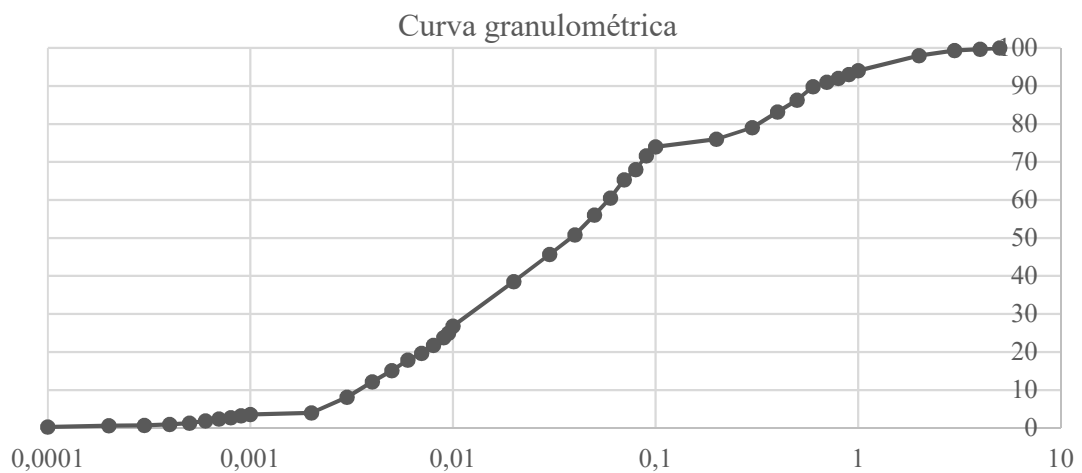
A análise granulométrica dos rejeitos coletados pela autora foi realizada através de peneiramento e granulometria a laser para o material passante na peneira 0,3 mm. Com a diferença das metodologias utilizadas na caracterização, a junção das análises granulométricas não gera resultados com padrão contínuo como pode ser observado na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 - Análise granulométrica rejeitos coletados em barragens – Estudo de Andrade (2014)

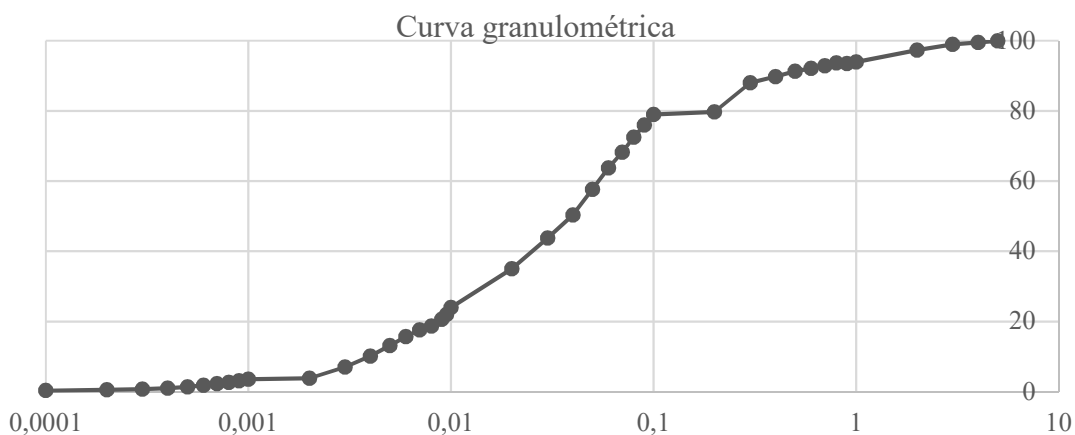
Barragem do complexo Itabirito (início em 1978)			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
2,70%	45,50%	48,90%	2,90%



Barragem do complexo Itabirito (início em 1988)			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
0,70%	34,00%	61,30%	4,00%

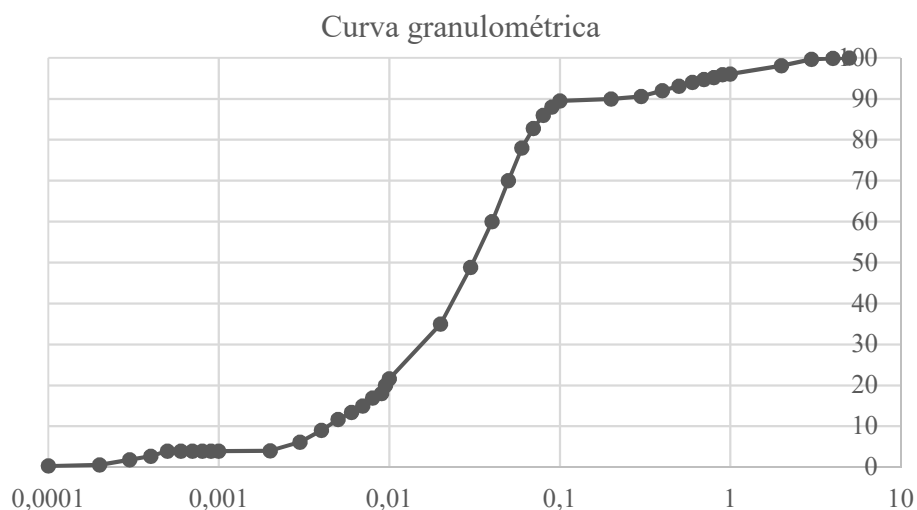


Barragem do complexo Itabirito (início em 1999)			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
1,00%	30,80%	64,40%	3,80%



Barragem na bacia do córrego Vargem Grande (início em 2000)

Pedregulho	Areia	Silte	Argila
0,30%	16,90%	78,80%	4,00%



Fonte: Adaptado de Andrade (2014)

A análise química do rejeito bruto foi realizada por meio de micro fluorescência de raios-X e os resultados obtidos por Andrade (2014) podem ser observados na Tabela 6.15.

Tabela 6.15 - Análise química rejeitos coletados em barragens – Estudo de Andrade (2014)

Amostra	Ano	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Outros Óxidos (%)
Barragens do complexo Itabirito	1978	49,49	44,48	5,49	0,54
	1988	33,92	59,96	5,63	0,48
	1999	36,27	58,13	5,01	0,58
Barragem na bacia do córrego Vargem Grande	2000	59,05	36,10	3,45	1,41

Fonte: Adaptado de Andrade (2014)

É possível observar, com base nos resultados apresentados, que a presença de óxido de ferro no rejeito coletado da barragem situada na bacia córrego Vargem Grande é consideravelmente maior que nas outras estruturas, fato que pode ser explicado pelo maior teor de ferro presente no material explorado na região, em torno de 60%, conforme citado anteriormente.

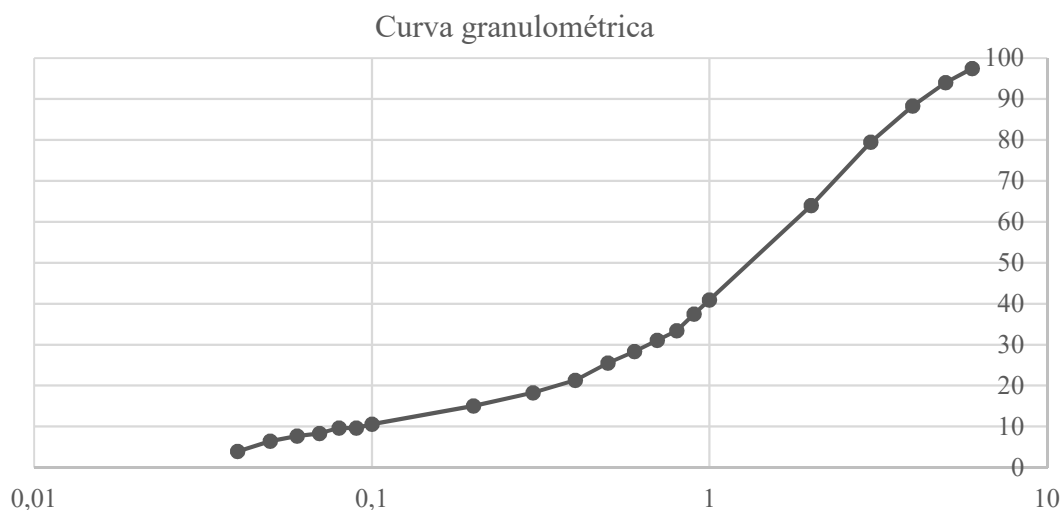
6.8. Rejeito Complexo Serra Sul

O trabalho desenvolvido por DAUCE *et al.* (2019) teve como finalidade apresentar resultados oriundos da avaliação de recuperação de massa, teor de ferro e sílica, resultantes do processo de concentração em amostras de rejeito oriundas do processo de jigagem do Complexo Serra Sul. Para o processo de concentração os autores iniciaram pelo processo de moagem do material e separação em materiais menores que 1,4 mm.

A caracterização granulométrica das amostras foi realizada por peneiramento combinado (úmido e seco), com variação das granulometrias de análise entre 6,3 mm e 0,037 mm. A publicação traz a caracterização granulométrica da amostra de rejeito do processo de jigagem e do material após a moagem e caracterização abaixo de 1,4 mm para separação magnética. Os resultados obtidos podem ser observados nas Tabelas Tabela 6.16 e Tabela 6.17.

Tabela 6.16 - Caracterização granulométrica rejeito do processo de jigagem – Complexo Serra Sul

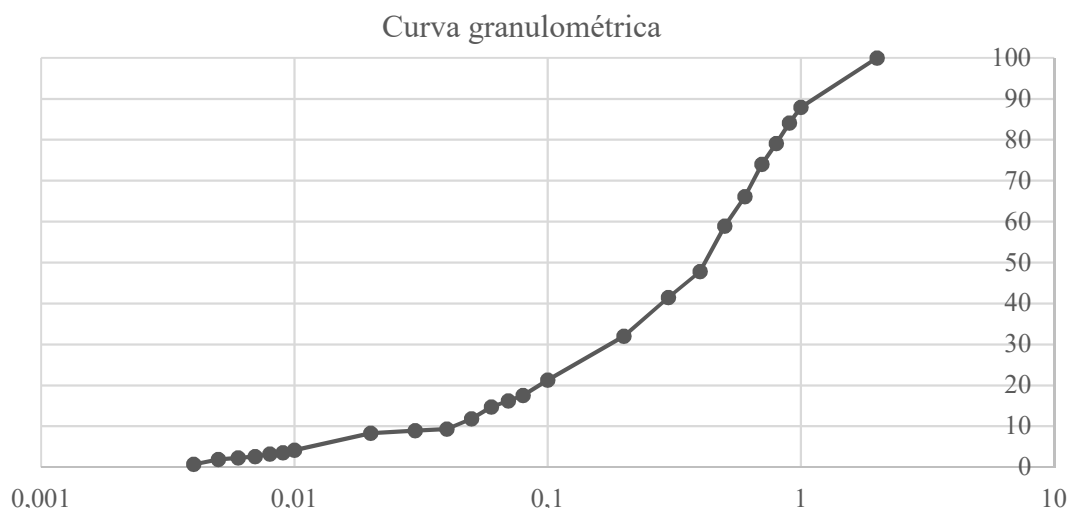
Rejeito do processo de Jigagem – Complexo Serra Sul			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
20,50%	71,20%	8,30%	-



Fonte: Adaptado de Dauce *et al.* (2019)

Tabela 6.17 - Caracterização granulométrica rejeito após moagem e seleção <1,4 mm – Complexo Serra Sul

Rejeito do processo de Jigagem após moagem e seleção – Complexo Serra Sul			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	83,80%	16,20%	-



Fonte: Adaptado de Dauce *et al.* (2019)

A determinação dos teores de ferro, sílica, manganês, fósforo e óxido de alumínio foi realizada através de testes de titulação. Os resultados obtidos no ensaio por faixa granulométrica podem ser observados na Tabela 6.18.

Tabela 6.18 - Caracterização química rejeito do processo de jigagem - Complexo Serra Sul

Granulometria (μm)	Peso (%)	Peso (%)				
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	P
+4760	7,6	38,3	37	2,8	0,03	0,18
-4760 + 2380	21,9	36,9	39,6	2,7	0,04	0,18
-2380 + 1400	19,7	28,7	52,5	2,1	0,15	0,14
-1400 + 840	16,1	19,7	65,8	2,1	0,32	0,12
-840 + 297	16,2	16,2	20,4	65,7	1,6	0,38
-297	18,5	18,5	39,1	39,5	1,6	0,22
Total	100					

Fonte: Adaptado de Dauce *et al.* (2019)

A caracterização mineralógica das amostras foi realizada por meio da análise no software X-ray Data Collector e os minerais identificados foram comparados à base de dados PDF-2 contida no software HighScore Plus. O trabalho publicado separou os minerais identificados por faixa granulométrica, seguindo a distribuição mostrada na Tabela 6.18. Todas as faixas

granulométricas apresentaram quartzo, hematita e goethita, e nas duas faixas granulométricas acima de 2380 µm foi identificada magnetita.

A presença de magnetita em apenas duas das faixas granulométricas é explicada pelos autores pelo baixo teor de magnetita presente em minerais do Quadrilátero Ferrífero, normalmente abaixo dos 5% em peso, pelo que não é possível ser identificado via padrão DRX, pois este só identifica minerais com percentual de massa acima de 3~5%.

6.9. Rejeito barragem Forquilha II

A barragem de rejeitos Forquilha II teve início de operação em 1988, está localizada no município de Ouro Preto, Minas Gerais, e recebia rejeitos oriundos do processo de beneficiamento de minério de ferro na Mina de Fábrica. Atualmente a estrutura encontra-se em nível 2 de emergência, com altura máxima do maciço de aproximadamente 90 metros e um volume de 22.778.397,90 m³ de material (ANM, 2023c, 2023b; PEREIRA, 2005).

A disposição de rejeitos na barragem teve fim em 2001, quando também se iniciou o processo de descomissionamento da estrutura. Em 2002 o dique que se encontrava a montante da praia de rejeitos sofreu uma ruptura parcial. Com o contato direto com o rejeito saturado, as análises preliminares da causa desta ruptura indicaram a possibilidade de liquefação, devido à saturação do material próximo ao dique (PEREIRA, 2005).

Como a estrutura encontrava-se com operações paralisadas, Pereira (2005) fez a coleta de amostras em um ponto central da praia de rejeitos, para análise. A caracterização do material foi realizada através de ICP e microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a composição mineralógica apresentou quartzo, hematita e goethita. A caracterização química pode ser observada na Tabela 6.19.

Tabela 6.19 - Caracterização química rejeito de barragem - Forquilha II

Amostra Composição (%)					
Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MnO ₂	PPC
53,96	18,47	1,47	0,05	0,42	0,42

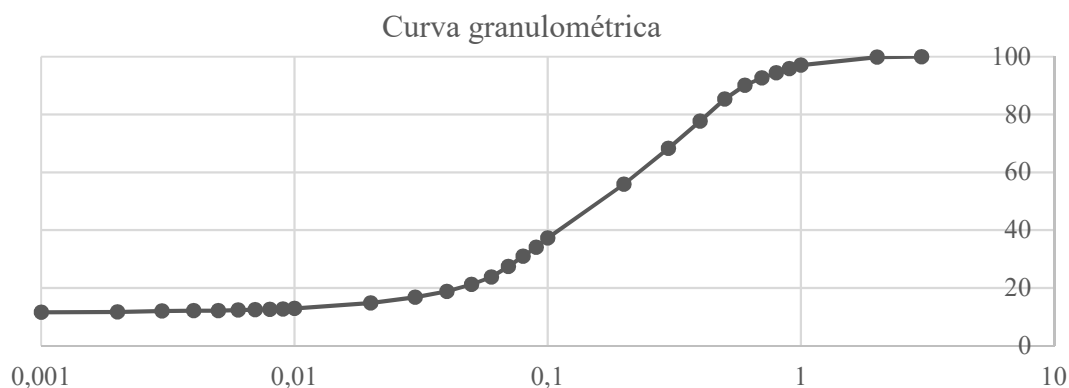
Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

Como a barragem teve paralisação de suas operações no ano de 2001, o alto teor de ferro presente no rejeito e a granulometria grosseira (quando comparado a outras barragens), como

pode ser observado através da Tabela 6.20, podem indicar processo produtivo com baixo aproveitamento de material. As curvas granulométricas do estudo de Pereira (2005) foram obtidas por meio de ensaios de peneiramento e sedimentação.

Tabela 6.20 - Curva granulométrica rejeito da barragem - Forquilha II

Pedregulho	Areia	Silte	Argila
0,10%	72,50%	15,36%	12,04%



Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

Para a caracterização física das amostras o autor utilizou a metodologia da mesa vibratória, assim como Presotti (2002), e ressalta que a metodologia deve ser adaptada aos tipos de rejeito que serão trabalhados. Para o estudo, Pereira (2005) utilizou 5 diferentes graus de saturação para obtenção dos índices de vazios e ressalta que, para os rejeitos analisados em seu estudo, foram obtidos maiores valores de massa específica para amostras com alto teor de saturação e para amostras com baixo teor de saturação, não sendo possível determinar um padrão para esta característica. Para os valores de índice de vazios o autor utilizou os valores extremos entre os graus de saturação estudados.

Com relação à amostra da barragem Forquilha II, o alto teor de ferro apresentado na amostra influencia diretamente no peso específico do rejeito, tendo sido obtidos valores acima dos médios encontrados para rejeitos de barragens do Quadrilátero Ferrífero, conforme pode ser observado na Tabela 6.21.

Tabela 6.21 - Caracterização física do rejeito da barragem Forquilha II

Gs (g/cm ³)	e	
	e _{min}	e _{máx}
4,796	0,735	1,625

Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

6.10. Rejeito barragem Forquilha III

A barragem de rejeitos Forquilha III está situada no município de Ouro Preto, Minas Gerais. Iniciou sua operação com a paralisação da barragem Forquilha II, recebendo assim o rejeito oriundo dos processos de beneficiamento de minério de ferro da Mina de Fábrica. A barragem possui sistema de alteamento a montante com maciços de terra compactada apoiada sobre rejeitos previamente dispostos (PEREIRA, 2005).

Atualmente, a estrutura é constituída por um maciço de 77 metros de altura e um volume de 19.476.113 m³, e está com operações paralisadas pois encontra-se em nível 3 de emergência, o que, segundo resolução 95 do órgão (ANM, 2022, 2023b), significa:

“a) a ruptura é inevitável ou está ocorrendo; ou

b) quando o Fator de Segurança drenado estiver abaixo de 1,1 ou Fator de Segurança não drenado de pico estiver abaixo de 1,0.”

Para as análises do rejeito contido na estrutura, Pereira (2005) coletou amostras a 1 m e 20 m de distância do ponto de lançamento dos rejeitos na estrutura para a caracterização do material e análise de suscetibilidade à liquefação. As análises realizadas nas amostras seguem os padrões descritos no tópico 6.9 deste trabalho.

As análises mineralógicas do rejeito apresentaram as mesmas características que a barragem Forquilha II para as duas amostras, apresentando quartzo, hematita e goethita, o que é esperado, pois as estruturas recebem rejeitos do mesmo processo produtivo e da mesma região. A análise química das amostras coletadas na estrutura pode ser observada na Tabela 6.22.

Tabela 6.22 - Caracterização química do rejeito da barragem Forquilha III

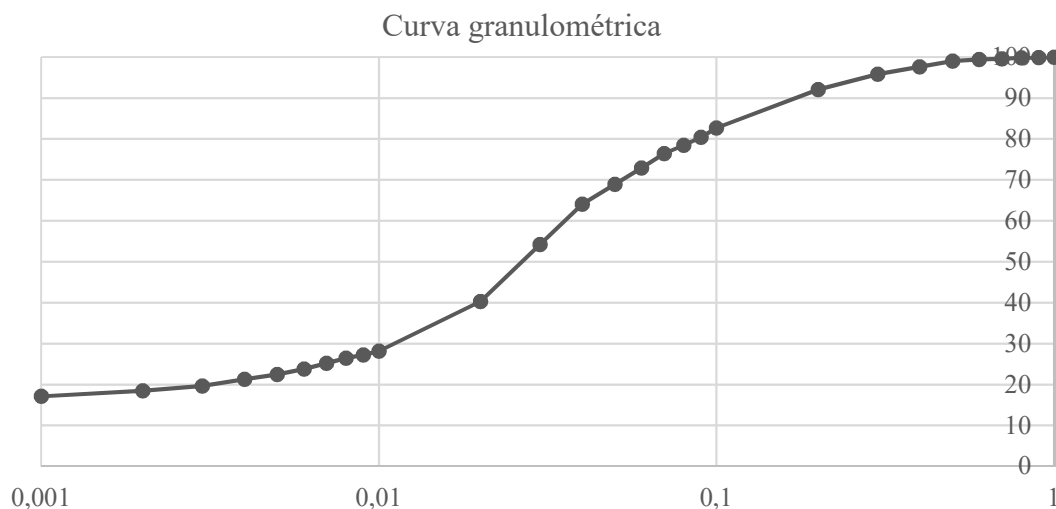
Amostra	Composição (%)					
	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MnO ₂	PPC
1 m do ponto de lançamento	35,17	43,17	2,26	0,07	0,69	0,69
20 m do ponto de lançamento	33,72	46,46	2,03	0,06	0,59	0,59

Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

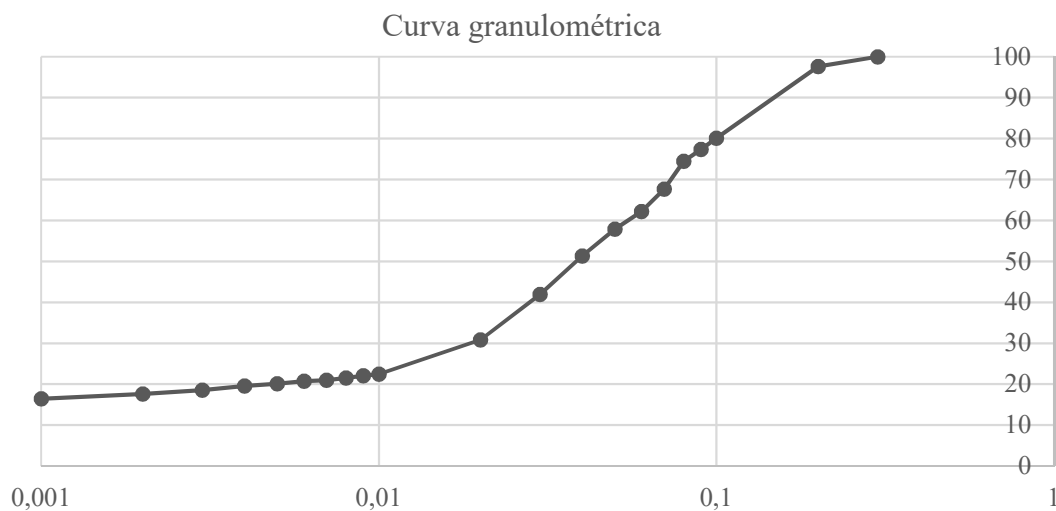
É possível observar uma redução no percentual de ferro e na granulometria do rejeito quando se compara os resultados obtidos para a barragem Forquilha II e Forquilha III. Esta redução pode estar associada a um melhor aproveitamento do material explorado, na Tabela 6.23 apresentam-se os resultados de granulometria.

Tabela 6.23 - Curva granulométrica rejeito da praia - Forquilha III

1 m do ponto de lançamento			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	23,57%	56,79%	19,64%



20 m do ponto de lançamento			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	32,34%	49,09%	18,57%



Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

Por meio da granulometria é possível observar que o rejeito localizado a 20 metros do ponto de lançamento apresenta menor teor de finos quando comparado à amostra retirada a 1 metro. Na Tabela 6.24 é possível visualizar que o peso específico dos grãos é menor a 20 metros do ponto de lançamento, o que é esperado, devido à segregação hidráulica que o material sofre na praia de rejeitos.

Tabela 6.24 - Caracterização física do rejeito da barragem Forquilha III

Amostra	Gs (g/cm³)	e_{mín}	e_{máx}
1 m do ponto de lançamento	3,945	0,642	1,766
20 m do ponto de lançamento	3,806	0,570	1,588

Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

6.11. Rejeito barragem Campo Grande

A barragem Campo Grande localiza-se no município de Mariana, Minas Gerais, sendo parte da mina de Alegria. A estrutura teve início de operação no ano de 1998 e seu maciço possui altura de 98 metros e um volume de 22.978.889,00 m³ de material. Atualmente a barragem está em nível 1 de emergência, e encontra-se em processo de descaracterização desde 2021 (ANM, 2023b, 2023c).

Para a campanha de caracterização do rejeito da barragem, Pereira (2005) realizou a coleta em um ponto único no maciço alteado da barragem, realizado no terceiro alteamento. Conforme cita o autor, eram previstos 7 alteamentos de 10 metros de altura no maciço da barragem para atendimento às necessidades de área para disposição.

A caracterização física, química e mineralógica da amostra de rejeito coletada por Pereira (2005) seguiu os mesmos procedimentos descritos no tópico 6.9 deste trabalho. A composição mineralógica da amostra estudada mostrou a presença de quartzo, hematita e goethita, assim como os rejeitos das barragens Forquilha II e III. A caracterização química da amostra pode ser observada na Tabela 6.25.

Tabela 6.25 - Caracterização química do rejeito da barragem Campo Grande

Amostra Composição (%)					
Fe	SiO₂	Al₂O₃	P	MnO₂	PPC
42,45	37,71	0,33	0,03	0,03	0,03

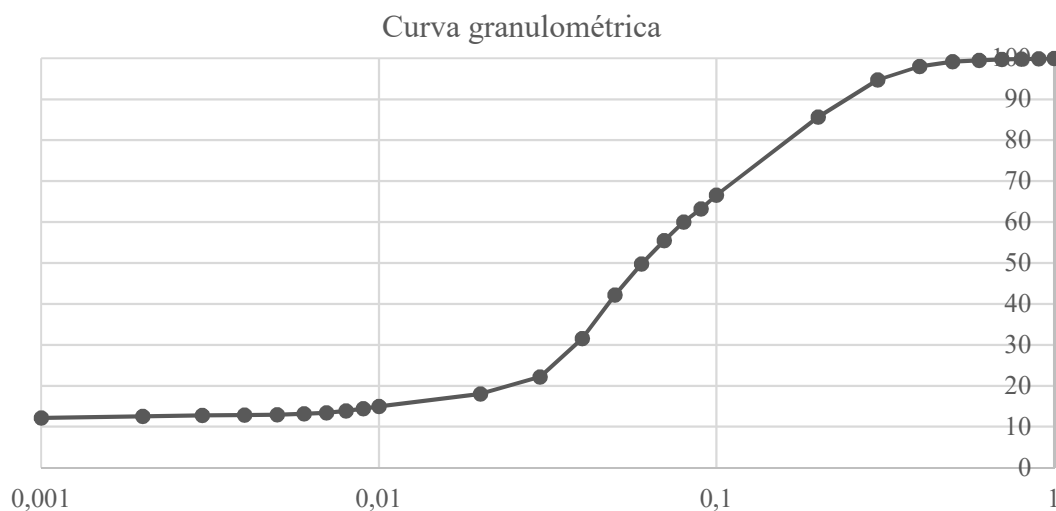
Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

Quanto à caracterização granulométrica, a amostra apresentou um rejeito com granulometria maior que o caracterizado para as barragens de Forquilha II e III. Como a amostra foi retirada de um dos alteamentos da barragem, esta pode ser a explicação pela granulometria bem definida

da amostra, que mostrou pouca variação, como pode ser observado na Tabela 6.26, em que aproximadamente 87% da amostra está contida entre 0,9 mm e 0,02.

Tabela 6.26 - Curva granulométrica rejeito do maciço - Campo Grande

Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	44,51%	42,76%	12,73%



Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

A caracterização física do rejeito apresenta uma massa específica dos grãos com um valor alto, conforme observa-se na Tabela 6.27, fato que pode ser explicado pelo alto teor de ferro na amostra coletada, conforme apresentado na Tabela 6.25.

Tabela 6.27 - Caracterização física do rejeito da barragem Campo Grande

G_s (g/cm³)	e_{mín}	e_{máx}
4,152	0,739	1,245

Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

6.12. Rejeito barragem Córrego do Doutor

A barragem Córrego do Doutor está localizada na mina de Timbopeba, município de Ouro Preto, Minas Gerais e recebia os rejeitos oriundos do processo de beneficiamento de itabirito da usina de Timbopeba (PEREIRA, 2005).

A barragem teve início de suas operações no ano de 2001 e desde 2022 encontra-se em descaracterização. Atualmente a barragem encontra-se em nível 1 de emergência e possui volume de 35.000.000 m³ com um maciço de 84 metros de altura (ANM, 2023c).

As amostras para caracterização do rejeito contido na estrutura realizada por Pereira (2005) foram coletadas a 1 m e 20 m de distância dos hidrociclones posicionados para lançamento de material.

A caracterização química, física e mineralógica das amostras da estrutura seguiu os procedimentos descritos no item 6.9 deste trabalho.

A composição mineralógica das amostras de rejeito apresentou quartzo e hematita para ambas as distâncias do ponto de lançamento do rejeito, porém, a amostra a 1 metro de distância apresentou também goethita. A caracterização química das amostras pode ser observada na Tabela 6.28.

Tabela 6.28 - Caracterização química do rejeito da barragem Doutor

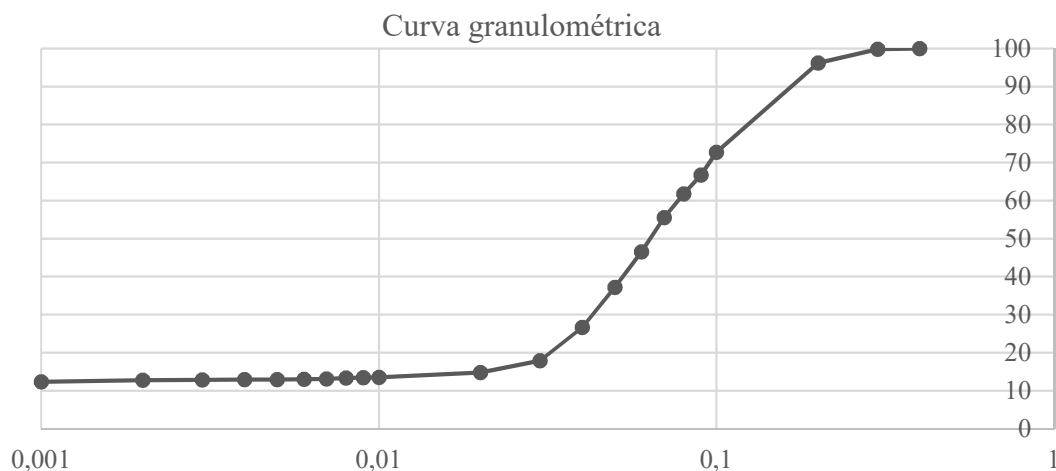
Amostra	Amostra Composição (%)					
	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MnO ₂	PPC
1 m do ponto de lançamento	23,00	66,29	0,44	0,01	0,04	0,04
20 m do ponto de lançamento	21,41	70,85	0,40	0,02	0,04	0,04

Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

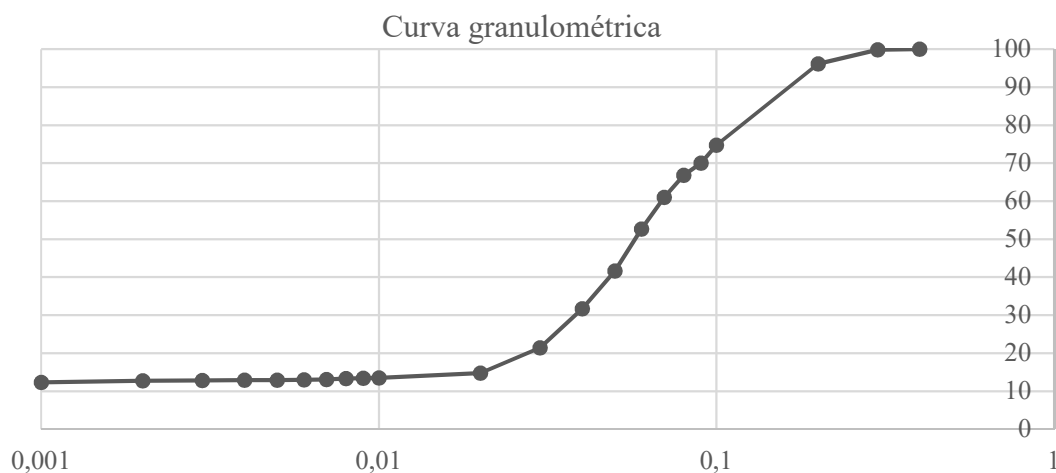
Conforme esperado foi identificado um menor teor de ferro para a amostra coletada a uma maior distância do ponto de lançamento, situação comum devido a segregação hidráulica na praia de rejeitos. É observado através dos resultados obtidos por Pereira (2005) uma pequena variação no teor de ferro com relação a distância, fato que pode ser observado também com relação à granulometria das amostras, conforme Tabela 6.29.

Tabela 6.29 - Curva granulométrica barragem Doutor

1 m do ponto de lançamento			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	44,51%	42,67%	12,82%



20 m do ponto de lançamento			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	38,96%	48,22%	12,82%



Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

A caracterização física das amostras realizada por Pereira (2005) apresentou um resultado incomum, com um maior peso específico dos grãos associado à amostra com menor teor de ferro, como pode ser observado na Tabela 6.30. Apesar de sair do padrão esperado, o resultado pode estar associado à baixa variação nos resultados obtidos para cada uma das amostras.

Tabela 6.30 - Caracterização física do rejeito da barragem Doutor

Amostra	Gs (g/cm ³)	e _{mín}	e _{máx}
1 m do ponto de lançamento	3,366	0,604	1,368
20 m do ponto de lançamento	3,397	0,612	1,245

Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

6.13. Rejeito barragem Itabiruçu

A barragem Itabiruçu está localizada no município de Itabira, Minas Gerais. Atualmente a estrutura encontra-se ativa, recebendo os rejeitos das usinas de beneficiamento de minério de ferro das minas de Conceição e Cauê. A barragem teve início de operação no ano de 1981 e ao longo de seu processo construtivo passou por alteamentos a jusante, resultando em uma altura atual de 68,10 metros. A estrutura possui volume de 166.955.292,10 m³ (ANM, 2023c).

O trabalho desenvolvido por Pereira (2005) cita que o processo de disposição de rejeitos oriundos do beneficiamento da mina de Conceição passava por hidrociclones, e os rejeitos de underflow eram direcionados para a barragem Itabiruçu, caracterizando assim um rejeito de maior granulometria presente na praia da barragem. Os rejeitos de overflow (finos) do processo eram direcionados para a barragem de Conceição. Para a caracterização do material da praia foi realizada a coleta de amostras deformadas a 1 m e 20 m de distância do ponto de lançamento de rejeitos.

A caracterização das amostras seguiu o padrão de ensaios descrito no item 6.9 deste trabalho. As amostras de rejeito apresentaram em sua composição mineralógica basicamente composta por quartzo e hematita. Além disso, a amostra coletada a 20 metros do ponto de lançamento do rejeito mostrou a presença de goethita.

Através da caracterização química das amostras, conforme apresentado na Tabela 6.31, é possível observar que as amostras apresentaram baixo teor de ferro, quando comparadas a rejeitos de outras estruturas apresentadas neste estudo. Além disso, é possível identificar que o padrão de redução de teor de ferro pela segregação hidráulica não foi seguido, pois o teor de ferro é maior a 20 metros do ponto de lançamento.

Tabela 6.31 - Caracterização química do rejeito da barragem Itabiruçu

Amostra	Amostra Composição (%)					
	Fe	SiO2	Al2O3	P	MnO2	PPC
1 m do ponto de lançamento	19,18	72,10	0,60	0,01	0,14	0,14
20 m do ponto de lançamento	20,95	80,90	0,66	0,02	0,13	0,13

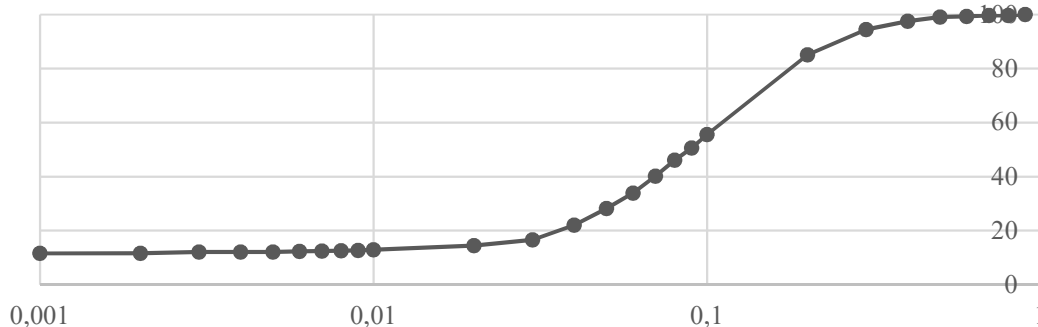
Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

Assim como a caracterização química, a análise granulométrica das amostras apresentou pouca variação, conforme pode ser visualizado na Tabela 6.32.

Tabela 6.32 - Curva granulométrica barragem Itabiruçu

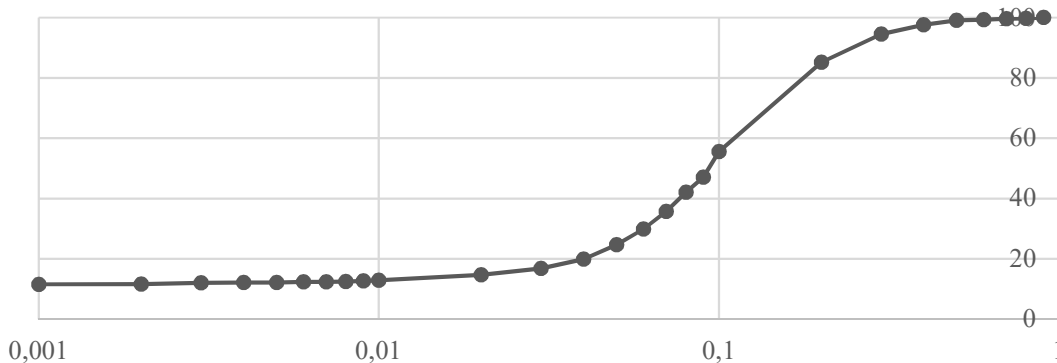
1 m do ponto de lançamento			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	59,77%	28,19%	12,04%

Curva granulométrica



20 m do ponto de lançamento			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	64,24%	23,72%	12,04%

Curva granulométrica



Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

Como o teor de ferro da amostra foi maior na distância de 20 metros do ponto de lançamento do rejeito, a massa específica dos grãos tende a ser maior neste ponto, fato comprovado pela caracterização física realizada por Pereira (2005), conforme demonstrado na Tabela 6.33.

Tabela 6.33 - Caracterização física do rejeito da barragem Itabiruçu

Amostra	Gs		
	(g/cm ³)	e _{mín}	e _{máx}
1 m do ponto de lançamento	3,337	0,670	1,392
20 m do ponto de lançamento	3,411	0,669	1,365

Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

6.14. Rejeito Barragem Fundão

A barragem de Fundão localizava-se no complexo Germano, no município de Mariana – MG e pertencia à Samarco Mineração. A estrutura rompeu em 5 de novembro de 2015, causando a morte de 19 pessoas e impactos ambientais de grande magnitude, atingindo o mar, a uma distância superior a 600 km (IBAMA, 2020).

O trabalho desenvolvido por Rezende (2013), publicado dois anos antes do desastre envolvendo a barragem Fundão, demonstra a preocupação da autora em relação aos cuidados e controles que devem existir para barragens de alteamento a montante. A autora detalha em seu trabalho os principais riscos e perigos associados a este tipo de estrutura de contenção de rejeitos, demonstrando a necessidade de estudos para conhecimento dos materiais existentes na estrutura, e elaboração de controles necessários para garantia de sua segurança.

Segundo o estudo, a estrutura iniciou suas operações em 2010 com um dique de partida com 30 metros de altura e aproximadamente 260 metros de extensão. Em 2013, ano de publicação da dissertação, a autora cita que haviam sido realizados 6 alteamentos na estrutura do dique 1, com a utilização do próprio rejeito arenoso, totalizando 30 metros de alteamento. A previsão em 2013 era que a estrutura do dique 1 passasse por 18 alteamentos, totalizando 90 metros de alteamento, e 120 metros de altura do maciço, com previsão de finalização para 2019.

Na dissertação publicada Rezende (2013) demonstra que o cenário de produção de rejeitos estava em crescimento no complexo Germano, demonstrando que a produção de rejeito total na mina aumentou em 22% entre os anos de 2009 e 2012. Segundo a autora, o rejeito arenoso

produzido na unidade, que representa uma média de 74% do rejeito total produzido entre os anos de 2009 e 2012, era direcionado ao empilhamento drenado da barragem Fundão, contido no dique 1; enquanto o rejeito de finos (lama) era disposto no dique 2, conforme Figura 6.1, além da cava Germano.

Figura 6.1 - Barragem Fundão e seus diques



Fonte: Rezende (2013)

Nas análises de caracterização dos rejeitos, a autora explicitou resultados de 3 campanhas de caracterização, sendo duas de rejeitos oriundos da praia de rejeitos e uma do rejeito em polpa.

Para a campanha A, a autora cita que se buscou pontos diferentes na praia para identificação da variabilidade de características do rejeito em função do peso específico dos grãos, alterando a distância em relação ao ponto de lançamento do rejeito, totalizando 17 pontos de coleta. Além do distanciamento dos pontos de coleta, para cada ponto foram retiradas duas amostras, a 10 e 50 cm da superfície. Essa campanha de amostragem foi realizada no ano de 2009, em uma cota 48 metros abaixo do nível existente em 2012.

Baseado nos resultados da campanha A é possível observar que as amostras coletadas 50 cm abaixo da superfície apresentavam uma tendência de maior teor de ferro e um menor teor de

sílica e, conseqüentemente, um maior peso específico dos grãos, característica que é observada nas áreas próximas ao lançamento.

Os resultados médios obtidos pela autora referentes à caracterização química e física da campanha de amostragem A podem ser observados nas Tabela 6.34 e Tabela 6.35.

Tabela 6.34 - Caracterização física rejeito amostrado da praia – Barragem Fundão

w (%)	γ (kN/m³)	γd (kN/m³)	P (%)	Gs	e	S (%)
10,99	17,35	15,62	90,23	3,01	0,9	37,52

Fonte: Adaptado de Rezende (2013)

Tabela 6.35 - Caracterização química rejeito amostrado da praia - Barragem Fundão

Fe (%)	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	P (%)	PPC (%)	MnO₂ (%)
17,54	73,89	0,26	0,01	0,73	0,01

Fonte: Adaptado de Rezende (2013)

A autora relata que a caracterização mineralógica do rejeito arenoso produzido na mina foi realizada em trabalhos anteriores, e cita que os resultados encontrados demonstram que os principais minerais identificados foram hematita, quartzo e goethita.

Para a campanha B, realizada também no ano de 2009, foram coletadas amostras em polpa da saída do processo de flotação. A densidade real dos grãos (Gs) média obtida das amostras foi de 2,92, com desvio padrão de 0,12.

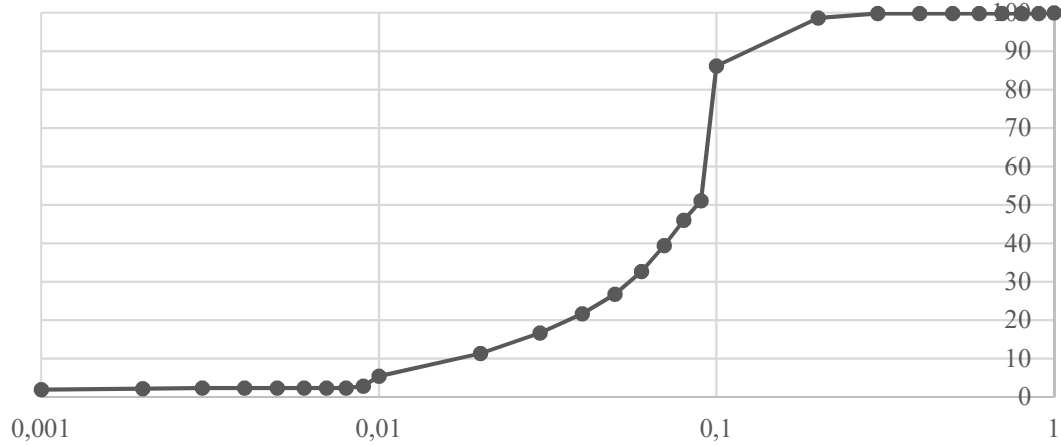
Com relação ao $e_{máx}$ e e_{min} , o valor médio obtido para as amostras referentes à campanha B foram de 1,04 e 0,57 respectivamente. No estudo da condutividade hidráulica as amostras da campanha B e C apresentaram valores da grandeza de 10^{-6} m/s.

Para a análise granulométrica a autora cita que foi realizado o mesmo procedimento para caracterização das campanhas B e C, realizando peneiramento a fino e ensaio de sedimentação. A Tabela 6.36 demonstra os resultados inferior e superior obtidos pela autora durante a campanha B e a Tabela 6.37 os resultados obtidos para os diferentes pontos de coleta realizados na campanha C.

Tabela 6.36 - Classificação granulométrica amostrado polpa da flotação – Barragem Fundão

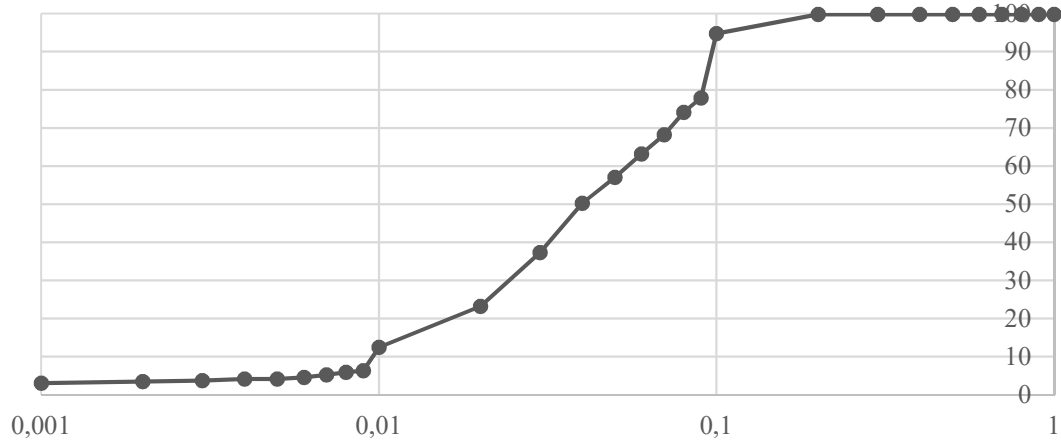
Limite inferior			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	60,53%	37,06%	2,41%

Curva granulométrica



Limite superior			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	31,88%	64,47%	3,73%

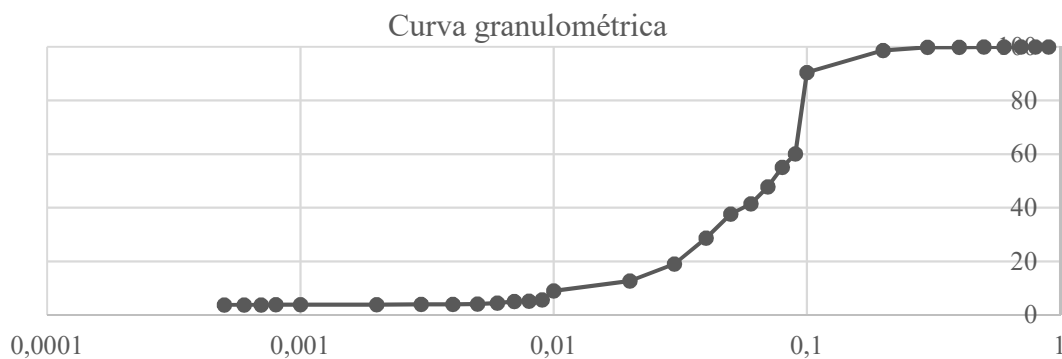
Curva granulométrica



Fonte: Adaptado de Rezende (2013)

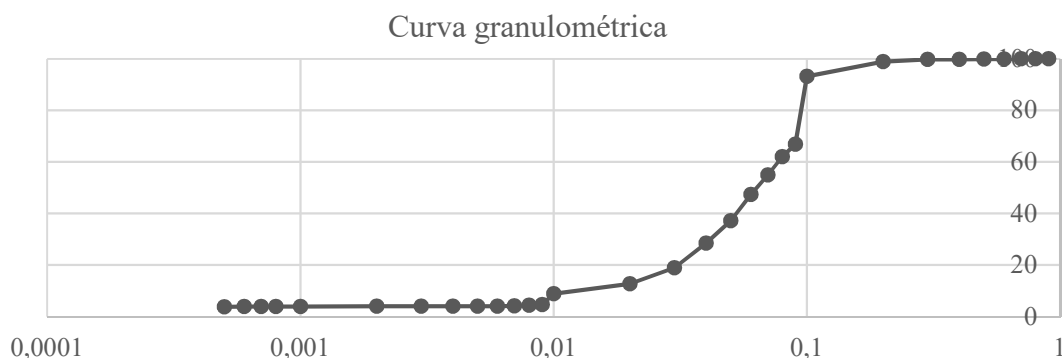
Tabela 6.37 - Classificação granulométrica amostrado da praia – Barragem Fundão

Maciço			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	52,19%	43,75%	4,06%



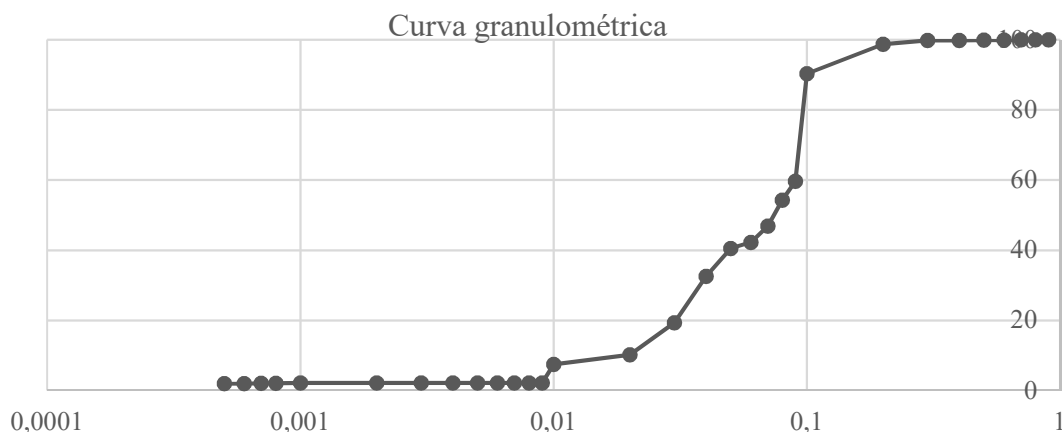
43 metros de distância do ponto de lançamento

Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	45,07%	50,98%	3,95%

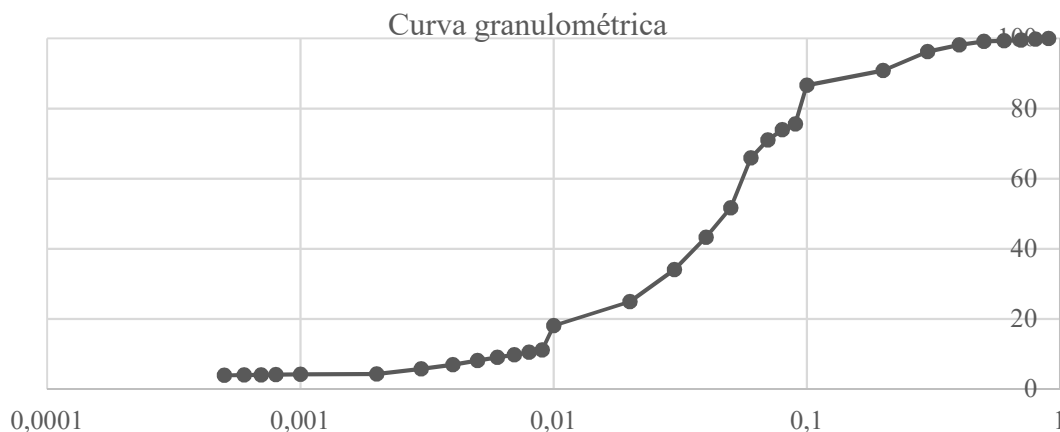


76 metros de distância do ponto de lançamento

Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	53,07%	44,74%	2,19%



110 metros de distância do ponto de lançamento			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	28,95%	65,24%	5,81%



Fonte: Adaptado de Rezende (2013)

Para retratar as condições de resistência do material existente a autora cita que foi utilizada a técnica de congelamento das amostras coletadas, pois assim garantiriam que os parâmetros de resistência como o ângulo de atrito não fossem afetados pela reconstituição das amostras.

Conforme caracterização granulométrica do estudo, a autora cita que não foi possível traçar um padrão para o perfil granulométrico com relação à posição das amostras na praia de rejeitos, com o rejeito com presença de materiais de maior granulometria sendo caracterizado a 110 metros da crista, onde esperava-se encontrar o rejeito com menor granulometria, conforme amostra coletada a 76 metros.

Na análise de índice de vazio máximo e mínimo da campanha C, a autora cita que foi realizada a caracterização média entre os pontos de coleta de amostras (praia de rejeitos e maciço), e a caracterização do bloco indeformado, coletado a 43 metros da crista. Para a média dos valores referentes aos pontos de coleta, os resultados obtidos foram $e_{máx} = 1,04$ e $e_{min} = 0,54$ e os valores obtidos através do ensaio de rejeitos do bloco indeformado foi $e_{máx} = 1,04$ e $e_{min} = 0,53$.

Para a realização dos ensaios triaxiais, as amostras coletadas e congeladas tiveram sua caracterização de umidade em campo, índice de vazios natural, peso específico e peso específico seco realizados, conforme Tabela 6.38.

Tabela 6.38 - Caracterização índices físicos amostra da praia de rejeitos - Barragem Fundão

Ponto de coleta	w %	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e_{nat}
Maciço	14,23	20,29	17,8	0,64
Praia de rejeitos - 10 m da crista	13,99	16,59	14,55	1,00
Praia de rejeitos - 43 m da crista	17,04	17,34	14,81	0,88
Praia de rejeitos - 76 m da crista	12,85	17,75	15,91	0,81
Praia de rejeitos - 110 m da crista	19,22	17,13	14,43	0,94

Fonte: Adaptado de Rezende (2013)

A autora ressalta que a amostra obtida a 10 metros da crista da barragem se encontrava fofa (característica comprovada nos resultados da análise tensão deformação do trabalho), apresentando um índice de vazios natural acima dos obtidos para as outras amostras. Também é importante ressaltar que apesar de possuir o mesmo material em sua composição, a crista da barragem passa por processos de compactação e conformação e, assim, apresenta um índice de vazios menor que as outras amostras. Como os materiais apresentam composições químicas próximas, o índice de vazios apresentado por cada material interfere diretamente em seu peso específico, conforme pode ser observado na Tabela 6.38.

6.15. Cava do Germano

A Cava do Germano recebia rejeitos do beneficiamento realizado no complexo Alegria, localizado no município de Mariana, e a disposição teve início em 2002, com a disposição de rejeitos granulares provenientes da obtenção de minério de ferro pelo beneficiamento de itabirito. A disposição na área é parte da reabilitação e reduziu as contribuições direcionadas à barragem Germano que, quando da publicação de Pereira (2005) recebia somente os rejeitos finos, permitindo o aumento da vida útil da estrutura.

A estrutura pertence a Samarco Mineração, sendo considerada uma cava com barramento construído, possui um volume de 13.100.000 m³ e altura de 55 metros do maciço. A barragem está em processo de descaracterização desde 2020 (ANM, 2023c) e recentemente teve seu processo finalizado.

Pereira (2005) cita que, para caracterização das amostras, foram coletadas amostras a 1 m e 20 m de distância do ponto de lançamento de material, e ressalta que a forma de lançamento do rejeito é de jusante para montante.

Os procedimentos de análise das amostras realizadas por Pereira (2005) são descritas no item 6.9 deste trabalho. A caracterização química das amostras coletadas na estrutura, que pode ser observada na Tabela 6.39, demonstra a redução do teor de ferro ao longo da praia de rejeitos, conforme segregação hidráulica das partículas mais pesadas.

Tabela 6.39 - Caracterização química amostra da praia de rejeitos – Cava Germano

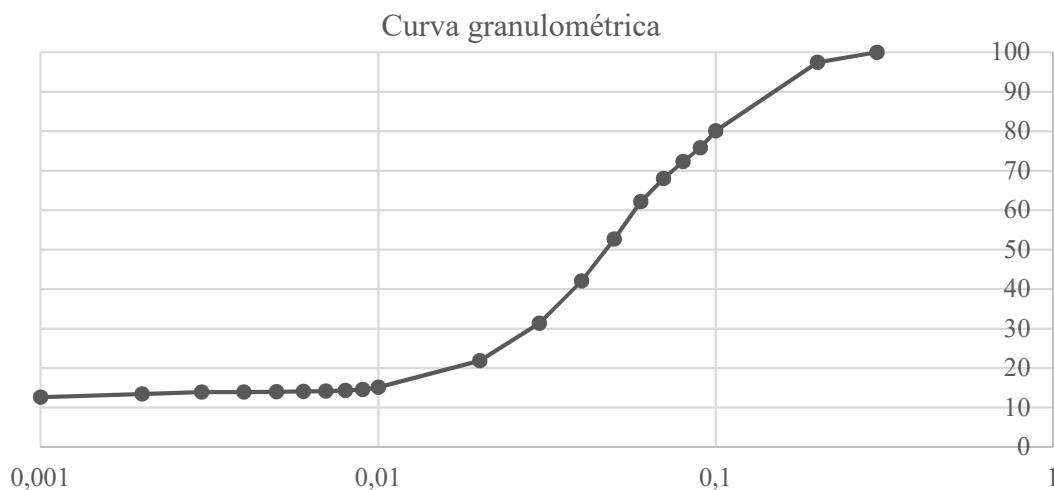
Amostra	Amostra Composição (%)					
	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	MnO ₂	PPC
1 m do ponto de lançamento	22,22	69,20	0,22	0,01	0,14	0,59
20 m do ponto de lançamento	17,60	76,65	0,22	0,01	0,02	0,40

Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

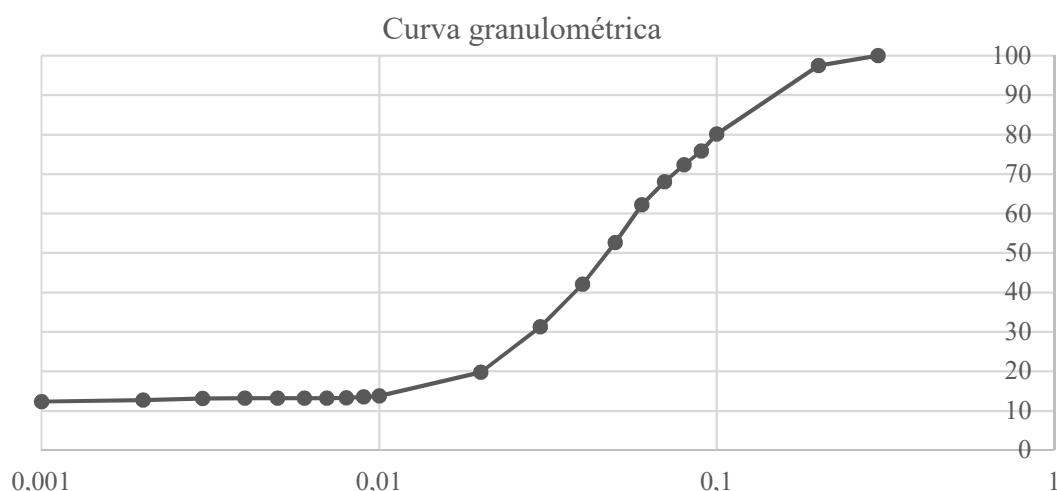
A caracterização granulométrica dos rejeitos apresentou pouca variação, conforme demonstrado na Tabela 6.40.

Tabela 6.40 - Curva granulométrica amostra da praia de rejeitos – Cava Germano

1 metro do ponto de lançamento			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	31,95%	54,15%	13,90%



20 metros do ponto de lançamento			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	31,95%	54,93%	13,12%



Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

A caracterização física da amostra segue o padrão da segregação hidráulica e composição química do rejeito, apresentando uma maior massa específica dos grãos para as amostras próximas ao ponto de lançamento do rejeito na estrutura, conforme apresentado na Tabela 6.41.

Tabela 6.41 - Caracterização física amostra da praia de rejeitos – Cava Germano

Amostra	Gs (g/cm ³)	E _{min}	E _{máx}
1 m do ponto de lançamento	3,395	0,624	1,327
20 m do ponto de lançamento	3,266	0,621	1,255

Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

6.16. Empilhamento drenado Monjolo

O empilhamento drenado Monjolo está situado na mina de Água Limpa, localizada em Rio Piracicaba – MG e teve início de suas operações em 1997. A mina teve início de operação no ano de 1963 e produz minério de ferro a partir da exploração de itabirito. O beneficiamento do minério na mina é realizado por espirais, o que resulta na produção de rejeitos com granulometria na faixa de areia fina e média (ANM, 2023c; SANTOS, 2004).

A estrutura possui método de alteamento a montante, sendo que os alteamentos utilizaram o próprio rejeito da praia. No ano de 2004, o maciço possuía 118,5 m de altura sendo que destes 100 m eram de alteamentos a partir do dique de partida. Segundo estudo publicado por Santos

(2004), a estrutura possuía monitoramento do processo de execução dos alteamentos através de medidas de densidade e eficiência dos drenos para garantir a segurança da estrutura.

Atualmente, o empilhamento possui 145 metros de altura com volume de 19.000.000 m³. O processo de descaracterização da estrutura iniciou em 2019 (ANM, 2023c).

Para a caracterização do rejeito da estrutura, Presotti (2002) coletou amostras referentes ao ensaio de simulação de deposição hidráulica (ESDH) realizado para a estrutura, referente aos pontos de lançamento e com distâncias de 40, 80 e 120 metros. Os resultados obtidos para a massa específica dos grãos e teor de ferro podem ser observados na Tabela 6.42.

Tabela 6.42 - Massa específica dos grãos e teor de ferro - Amostras referentes ao ESDH - Empilhamento Drenado Monjolo

Amostra	Gs (g/cm³)	Fe (%)
Ponto de lançamento	4,410	72,40
40 m	3,168	22,72
80 m	3,040	17,60
120 m	2,886	11,44

Fonte: Adaptado de Presotti (2002)

Presotti (2002) determinou o teor de ferro em cada uma das amostras, por meio da equação obtida em estudos anteriores realizados na barragem, em que foi realizado uma análise da relação entre a massa específica dos grãos, massa específica do quartzo e do ferro, e o teor de ferro das amostras obtidas.

No estudo publicado por Santos (2004), além da caracterização das amostras de rejeito do simulador, foi realizada a caracterização de amostras obtidas em campo, que foram coletadas em conjunto com o processo verificação das condições de infiltração em campo. O teor de ferro foi determinado por meio da equação utilizada por Presotti (2002) e pelo método de redução por cloreto de titânio III. A caracterização do peso específico e teor de ferro por distância do ponto de lançamento pode ser visualizada na Tabela 6.43.

Tabela 6.43 - Massa específica dos grãos e teor de ferro - Amostras coletadas em campo - Empilhamento Drenado Monjolo

Amostra	Distância do ponto de lançamento (m)	Gs (g/cm³)	Fe (Equação pré-definida) (%)	Fe (Análise química) (%)	Variação (%)
01	10	3,14	21,6	22,4	0,8
02	20	3,16	22,5	18,9	-3,6
03	20	3,14	21,4	24,1	2,7
04	20	3,01	16,6	20,2	3,6
05	30	3,19	23,7	26,6	2,9
06	30	2,95	13,9	17,6	3,7
07	30	2,95	13,9	16,5	2,6

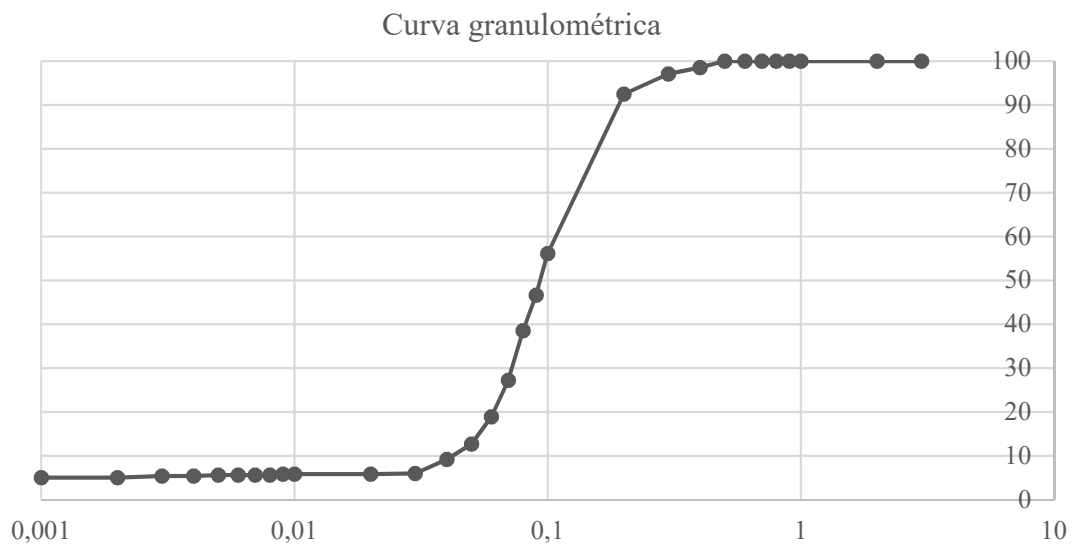
Fonte: Adaptado de Santos (2004)

A análise de ensaio químico para a caracterização do teor de ferro elaborado por Santos (2004) demonstra a importância de uma campanha laboratorial completa para amostras. As particularidades dos rejeitos oriundas dos processos produtivos, área de exploração e forma de disposição dificultam a elaboração de equações padronizadas, relacionando características como o peso específico dos grãos e o teor de ferro. Apesar das diferenças, o autor se mostra favorável à aplicação do método numérico aplicado no estudo de Presotti (2002), e, segundo relatado, a análise química laboratorial realizada no estudo é baseada na variação da coloração do material, podendo existir uma variação de resultados conforme experiência do operador na determinação dos parâmetros. Para comprovação da metodologia de cálculo aplicada, o autor elaborou gráficos de variação do teor de ferro obtido através da relação com massa específica dos grãos, demonstrando a linearidade da interpolação dos resultados obtidos.

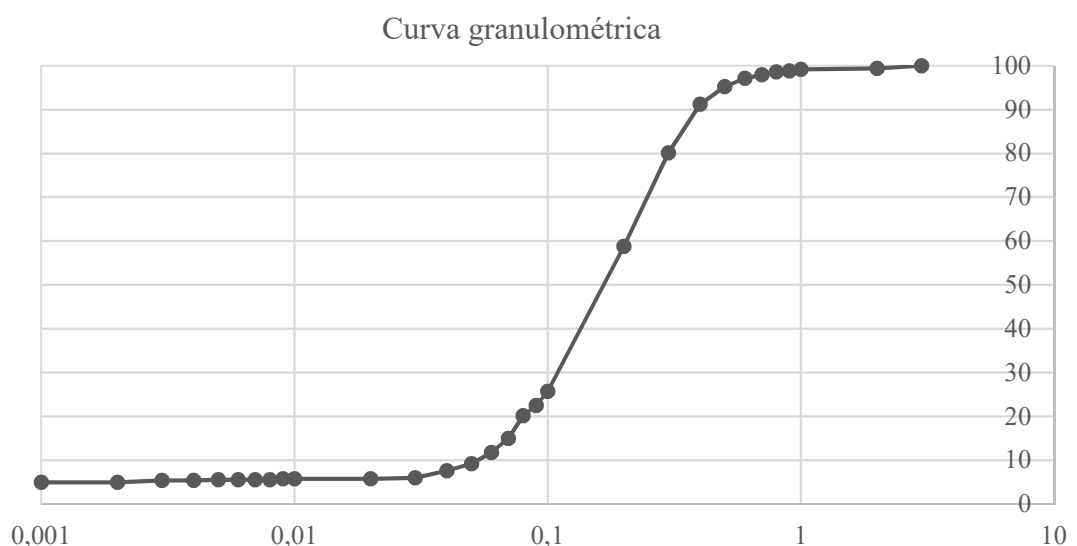
Para a determinação das curvas granulométricas, Presotti (2002) realizou ensaios de sedimentação e peneiramento a fino. Na Tabela 6.44 é possível observar a caracterização, por faixa granulométrica, das amostras referente a simulação ESDH.

Tabela 6.44 - Curva granulométrica - Amostras referentes ao ESDH - Empilhamento Drenado Monjolo

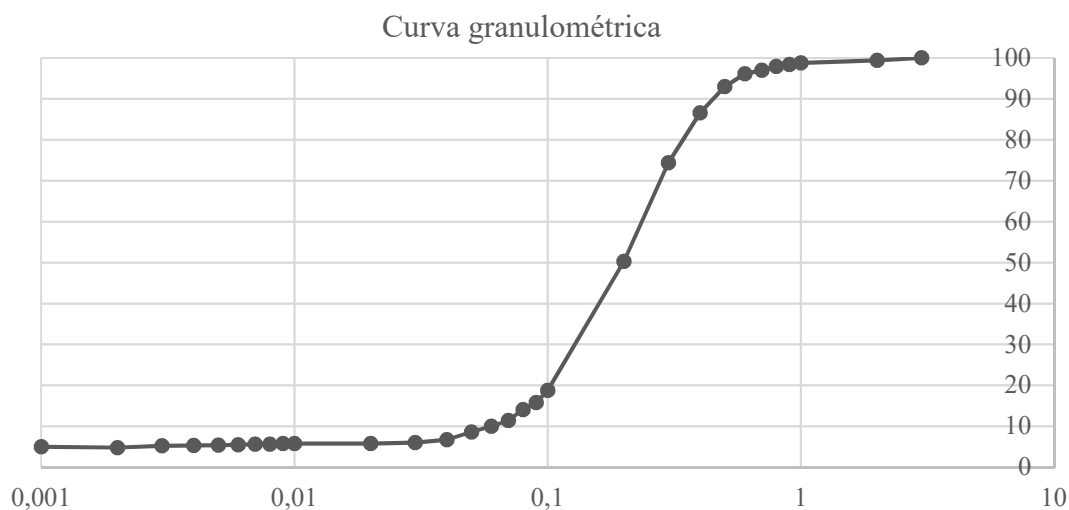
Ponto de lançamento			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	72,80%	21,80%	5,40%



40 metros de distância do ponto de lançamento			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	85,00%	9,60%	5,40%

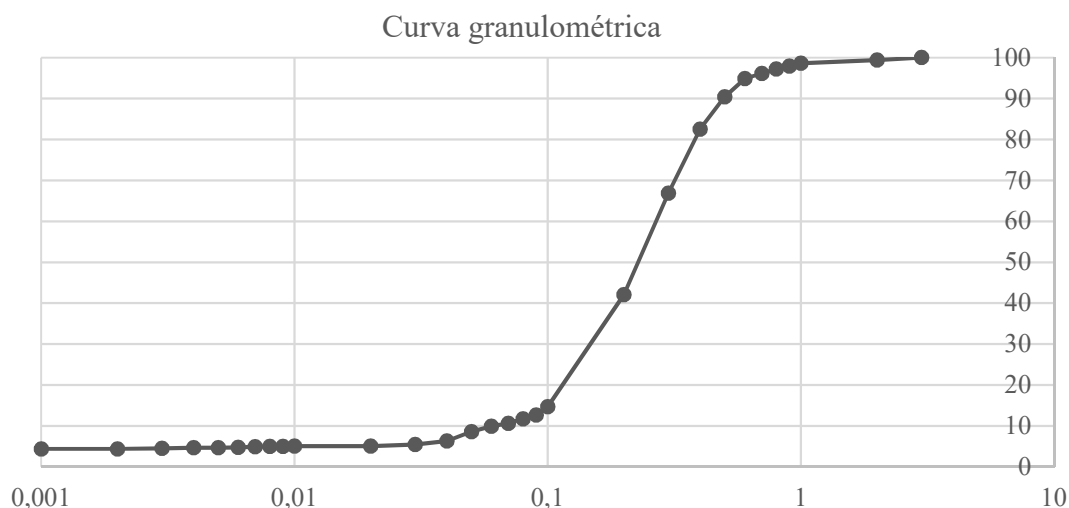


80 metros de distância do ponto de lançamento			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	88,60%	6,20%	5,20%



120 metros de distância do ponto de lançamento

Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	89,40%	6,10%	4,50%



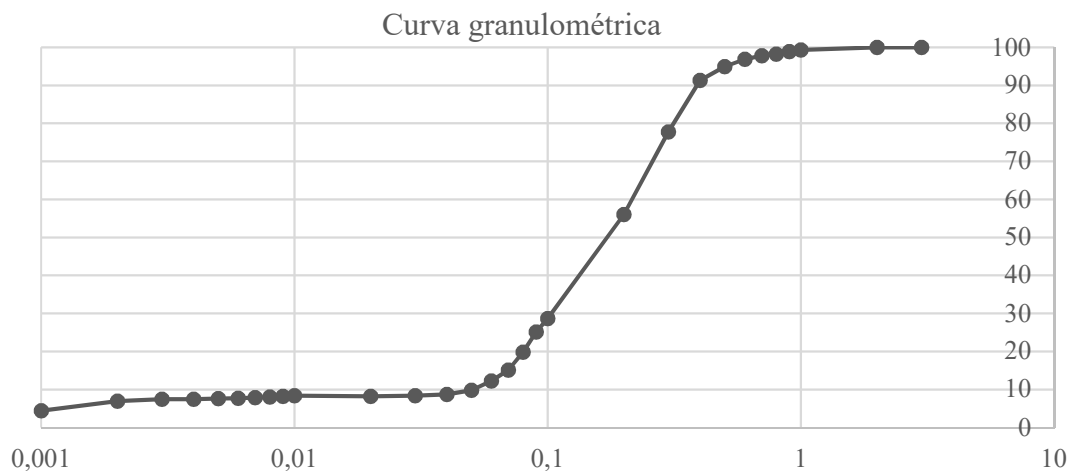
Fonte: Adaptado de Presotti (2002)

Com base nos dados obtidos pelo autor é possível observar um padrão de aumento da granulometria com o aumento da distância do ponto de coleta ao ponto de lançamento do material.

Santos (2004) realizou a análise granulométrica das amostras obtidas em campo nos ensaios de infiltração, conforme valores demonstrados na Tabela 6.45.

Tabela 6.45 - Curva granulométrica – Amostras coletadas em campo – Empilhamento Drenado Monjolo

Valor médio das amostras coletadas			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	84,90%	7,70%	7,40%



Fonte: Adaptado de Santos (2004)

Apesar da realização de ensaios de granulometria nas 7 amostras, a Tabela 6.45 traz uma curva intermediária entre todas as amostras, devido à proximidade de resultado que estas apresentam no trabalho publicado por Santos (2004). A proximidade destes valores pode ser explicada pela pequena variação de distância dos pontos de coleta em relação ao ponto de lançamento do rejeito, sendo estes espaçados em 10 metros.

Para a determinação dos índices de vazio máximo e mínimo ($e_{\text{máx}}$ e $e_{\text{mín}}$), Presotti (2002) utilizou 3 amostras de cada um dos pontos de coleta, e realizou os ensaios para índice de vazios mínimo através da técnica de vibração com amostras secas em estufa e úmidas, e o índice de vazios máximo apenas com amostras secas em estufa através da técnica de pluviação. Os resultados médios obtidos para cada ponto de coleta podem ser observados na Tabela 6.46.

Tabela 6.46 - Índice de vazos máximo e mínimo - Amostras referentes ao ESDH - Empilhamento Drenado Monjolo

Amostra	$e_{\text{mín}}$ (seco)	$e_{\text{mín}}$ (úmido)	$e_{\text{máx}}$
Ponto de lançamento	0,744	0,649	1,043
40 m	0,696	0,63	0,947
80 m	0,639	0,596	0,896
120 m	0,63	0,583	0,899

Fonte: Adaptado de Presotti (2002)

Para verificação da influência do teor de ferro nos valores de e_{\min} obtidos para as amostras, o autor fez ensaios variando o teor de ferro para os métodos de vibração com amostras úmidas e secas. Nesta análise, foi possível observar que o valor obtido para e_{\min} aumenta de acordo com o acréscimo de teor de ferro na amostra. Presotti (2002) demonstra também que a maior variação de índice de vazios para amostras úmidas e secas foi obtido para as amostras com maior teor de ferro, o que pode estar associado ao maior efeito de lubrificação nas partículas de ferro do que no quartzo.

Para a determinação dos valores de e_{\max} e e_{\min} , Santos (2004) utilizou a mesma metodologia aplicada por Presotti (2002), e os valores obtidos podem ser observados na Tabela 6.47.

Tabela 6.47 - Índice de vazos máximo e mínimo - Amostras coletadas em campo - Empilhamento Drenado Monjolo

Amostra	Distância do ponto de lançamento (m)	e_{\min} (seco)	e_{\min} (úmido)	e_{\max}
01	10	0,63	0,58	0,99
02	20	0,65	0,59	0,99
03	20	0,61	0,56	0,95
04	20	0,55	0,51	0,93
05	30	0,61	0,56	0,97
06	30	0,57	0,52	0,88
07	30	0,57	0,53	0,94

Fonte: Adaptado de Santos (2004)

Na caracterização das amostras retiradas da praia de rejeitos do empilhamento Monjolo, Santos (2004) realizou a caracterização do material *in situ* através do método do cilindro biselado e frasco de areia, que são retratados na Tabela 6.48 como 1 e 2 respectivamente. Os resultados obtidos de massa específica úmida, massa específica seca e índice de vazios para cada um dos métodos podem ser observados a seguir.

Tabela 6.48 - Caracterização física amostras da praia de rejeitos - Empilhamento Drenado Monjolo

Amostra	Distância do ponto de lançamento (m)	Massa específica úmida (g/cm ³)		Massa específica seca (g/cm ³)		Teor de umidade (%)		Índice de vazios (e)	
		1	2	1	2	1	2	1	2
01	10	1,961	1,835	1,754	1,624	14,30	13,00	0,79	0,93
02	20	1,905	1,897	1,736	1,679	9,70	13,00	0,82	0,88
03	20	1,877	1,938	1,725	1,753	8,80	10,60	0,82	0,79
04	20	1,797	1,708	1,672	1,584	7,50	7,80	0,80	0,90
05	30	1,875	1,884	1,747	1,776	7,30	6,10	0,83	0,80
06	30	1,767	2,138	1,612	1,942	9,60	10,10	0,83	0,52
07	30	1,858	1,886	1,618	1,647	14,80	14,50	0,82	0,79

Fonte: Adaptado de Santos (2004)

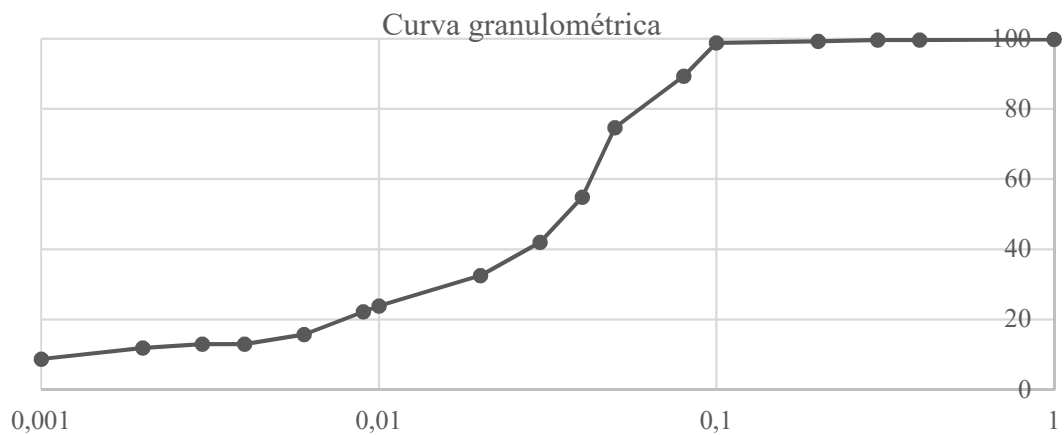
6.17. Rejeito Filtrado sem descrição do empreendimento

O estudo desenvolvido por Carneiro (2021) teve foco na caracterização e análise de rejeitos de uma mineração localizada no Quadrilátero Ferrífero para a viabilização de construção de pilhas de rejeito superiores a 100 metros de altura. No processo de empilhamento da mineradora, os rejeitos totais (underflow e overflow) são depositados após processo de filtragem.

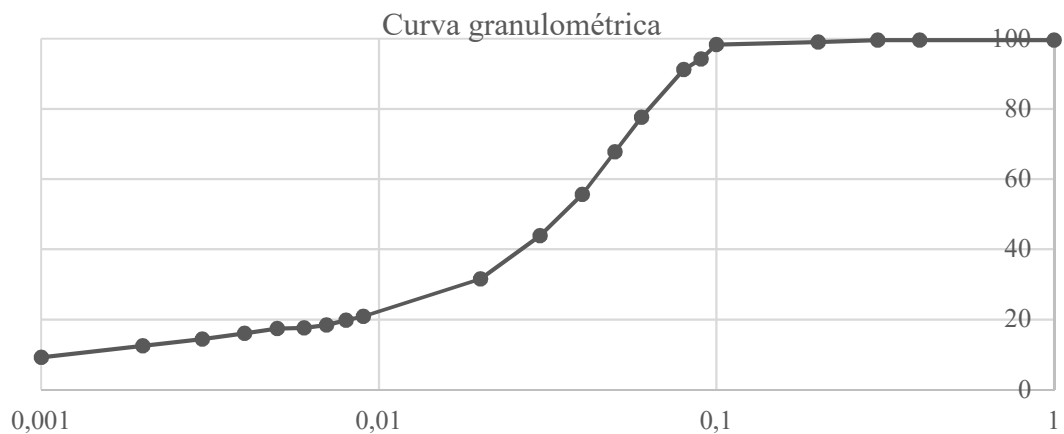
Para a caracterização granulométrica, o autor cita que foram realizados 24 testes no laboratório da UFV (Universidade Federal de Viçosa), sendo 1 antes da realização de testes de compressão triaxial, e 23 após a realização dos testes, assim, permitindo a avaliação do comportamento do material (possibilidade de esmagamento) quando submetido a diferentes tensões confinantes. Na Tabela 6.49, é possível observar que a compactação não alterou significativamente a curva granulométrica do material. Vale ressaltar que os resultados apresentados correspondem a um valor médio dos resultados apresentados no trabalho do autor. Além disso, o autor realizou a caracterização de amostras antes e depois da compactação proctor, realizados no laboratório de Geotecnia da FEUP (Faculdade de Engenharia Universidade do Porto), onde foi identificada a quebra de partículas devido à compactação dinâmica através do aumento de finos, o que pode ser constatado através dos resultados apresentados nas Tabela 6.50.

Tabela 6.49 - Caracterização granulométrica rejeito filtrado antes e depois dos ensaios triaxiais - Estudo Carneiro (2021)

Caracterização antes do ensaio triaxial			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	15,60%	71,40%	13,00%



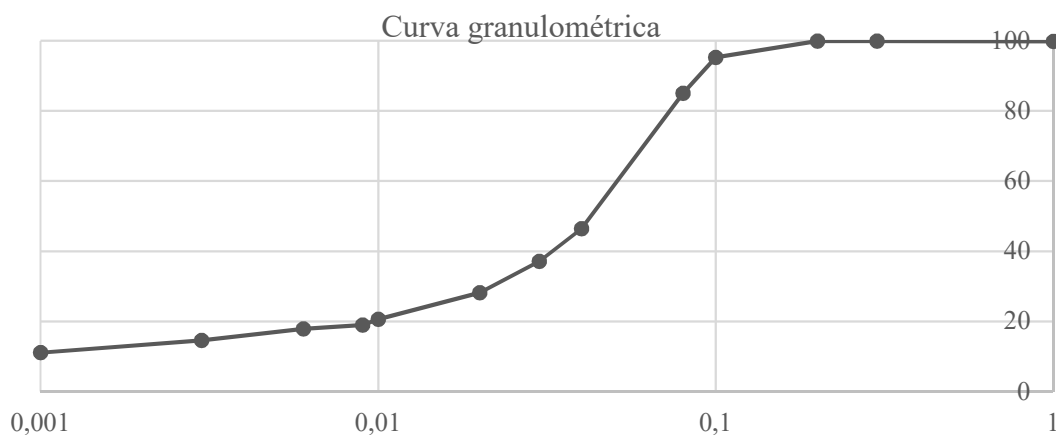
Caracterização pós ensaio triaxial			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	22,40%	63,20%	14,40%



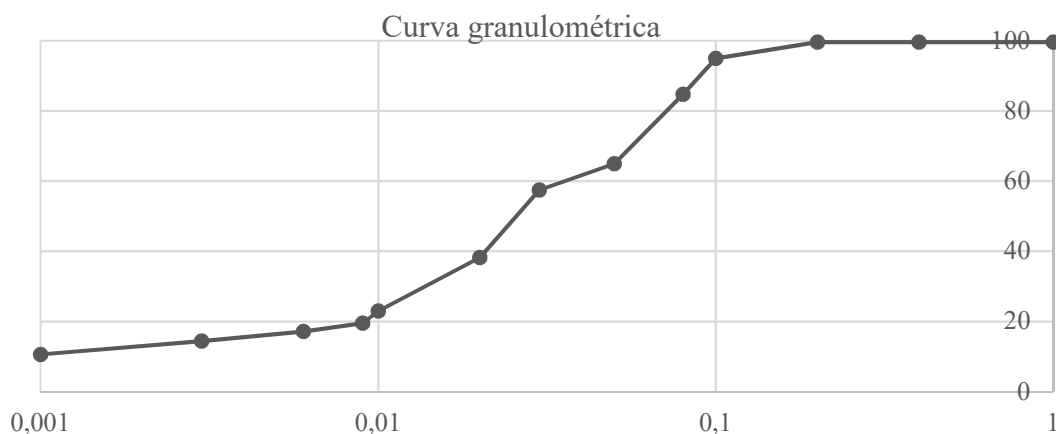
Fonte: Adaptado de Carneiro (2021)

Tabela 6.50 - Caracterização granulométrica rejeito filtrado antes e depois dos testes proctor - Estudo Carneiro (2021)

Caracterização antes do ensaio Proctor			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	24,65%	66,00%	9,35%



Caracterização pós ensaio Proctor			
Pedregulho	Areia	Silte	Argila
-	20,25%	71,05%	8,70%



Fonte: Adaptado de Carneiro (2021)

Para avaliação da densidade real dos grãos (G_s), o autor realizou a análise em 3 amostras, e o resultado médio obtido foi $3,205 \text{ g/cm}^3$. Nas avaliações de peso específico (γ_d) foram executados ensaios para as amostras coletadas em campo e após a realização do ensaio de compactação proctor. Para as amostras coletadas, foram obtidos $\gamma_{d, \text{máx}} = 19,7 \text{ kN/m}^3$ e $\gamma_{d, \text{min}} = 14,46 \text{ kN/m}^3$, além de um índice de vazios (e) correspondente a $e_{\text{máx}} = 1,18$ e $e_{\text{min}} = 0,6$. Após a realização da compactação proctor o peso específico apresentou um aumento, que pode

ser explicado pela quebra de algumas partículas e preenchimento dos vazios existentes na amostra inicial, chegando ao valor de $\gamma_{d, \text{máx}} = 21,05 \text{ kN/m}^3$. A umidade ótima do material obtida foi de $w_{\text{ot.}} = 11,7\%$.

O autor não realizou a caracterização mineralógica do rejeito estudado.

7. RESULTADOS

As caracterizações dos materiais contidos nas estruturas de disposição de rejeitos permitem maior conhecimento dos seus comportamentos, como condutividade hidráulica na praia, posição freática e resistência do material. Essas características auxiliam não apenas na avaliação da segurança destas estruturas, mas também podem estabelecer uma possível destinação dos rejeitos, o que corrobora com a redução dos volumes de rejeito dispostos e, conseqüentemente, aumenta a vida útil de estruturas estratégicas para empreendimentos minerários.

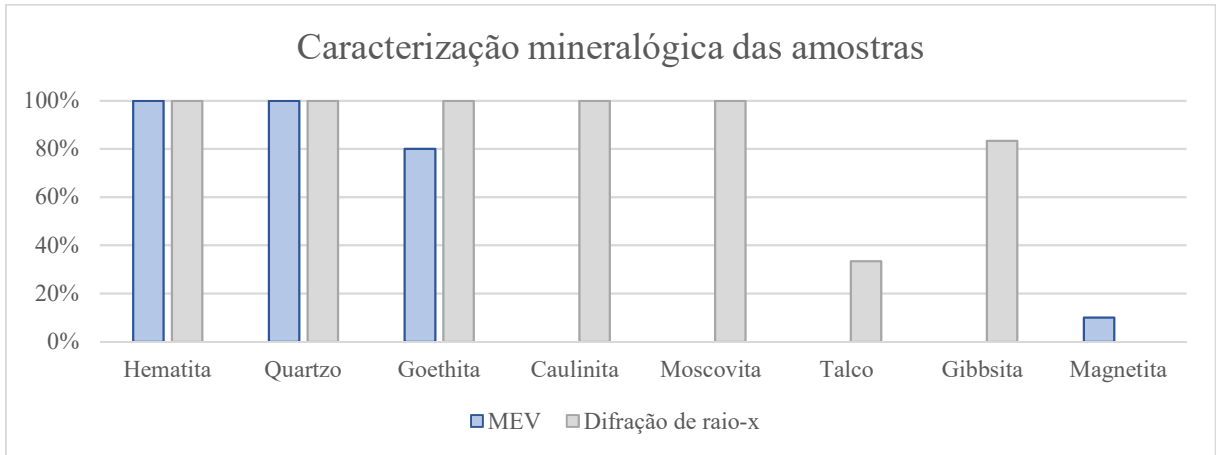
Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos através das publicações analisadas e que caracterizaram rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero conforme referenciados no capítulo anterior, bem como as diferentes formas de disposição.

7.1. Caracterização mineralógica e química dos rejeitos do Quadrilátero Ferrífero

As características mineralógicas dos rejeitos do Quadrilátero Ferrífero tendem a convergir, mostrando pequenas diferenças nas proporções encontradas de cada um dos minerais, de acordo com a região e processo produtivo, pois o beneficiamento do minério de ferro é basicamente um processo de cominuição (redução no tamanho das partículas) e separação de material para concentração desejada.

Os rejeitos caracterizados no item 6 deste trabalho apresentaram hematita e quartzo, caracterizando a presença de óxido de ferro e sílica, respectivamente. Os principais minerais identificados são hematita (Fe_2O_3), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), quartzo (SiO_2), talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e moscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$). A Figura 7.1 demonstra a porcentagem de amostras que apresentaram presença de cada um dos minerais citados.

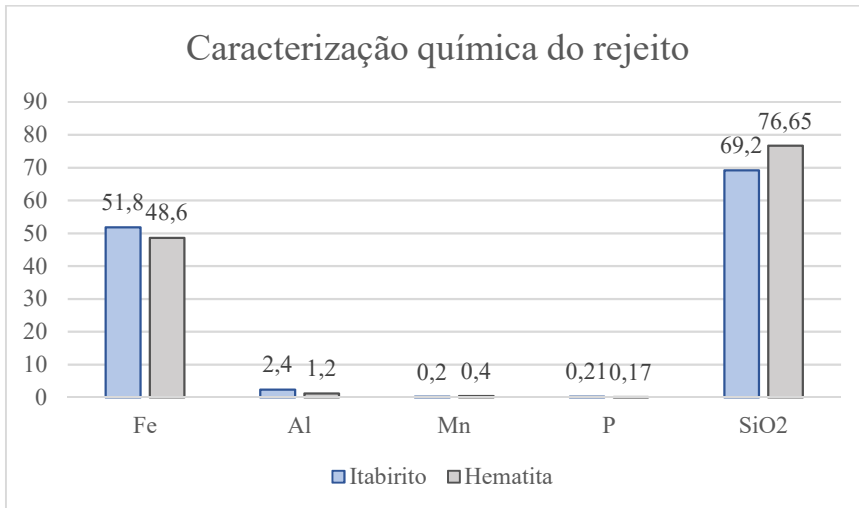
Figura 7.1 - Caracterização mineralógica rejeitos do Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Elaborado pelo autor

As composições químicas dos rejeitos são influenciadas diretamente pela área de lavra do empreendimento, processo de beneficiamento e área de coleta. Como exemplo das diferenças geradas pela área de exploração a Figura 7.2 retrata as variações obtidas na caracterização química de materiais oriundos da mesma usina na saída do espessador de lamas, advindos do beneficiamento de hematita e itabirito.

Figura 7.2 - Diferença da composição química entre rejeitos oriundos do processo de beneficiamento de rochas distintas

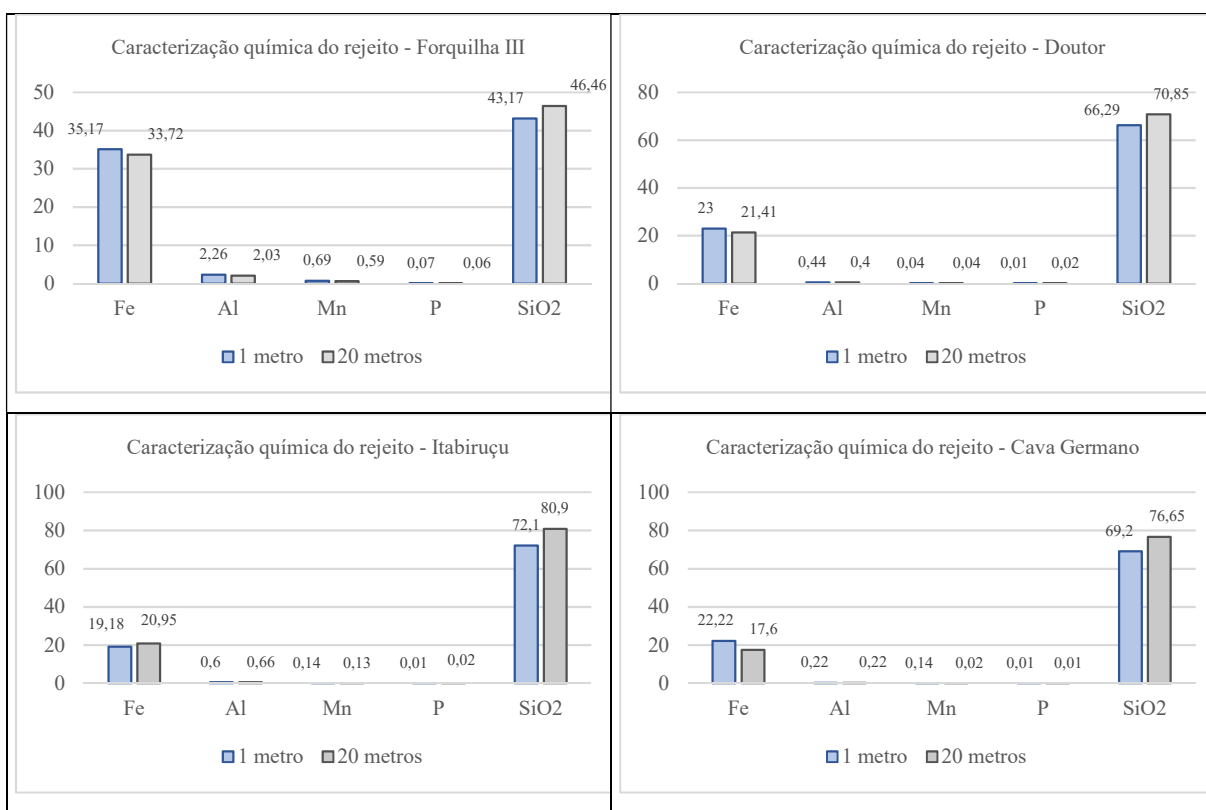


Fonte: Adaptado de Wolff (2009)

A segregação hidráulica de rejeitos influencia na granulometria e composição química dos rejeitos coletados devido à densidade de cada um dos elementos, sendo caracterizados pela presença de materiais com maior densidade próximo ao ponto de lançamento e materiais com

menor densidade ao longo da praia de rejeitos. Conforme características químicas apresentadas pelos rejeitos do Quadrilátero Ferrífero os materiais de maior densidade estão associados à presença de ferro e os de menores densidade associados à sílica. Na Tabela 7.1, pode-se observar que, em todos os resultados obtidos por Pereira (2005), a presença de sílica é maior nos rejeitos coletados a uma distância maior do ponto de lançamento e que o padrão de teor de ferro ser maior próximo ao ponto de descarga só não foi encontrado para a barragem Itabiruçu (encontrando uma variação de teor de ferro de apenas 1,77%).

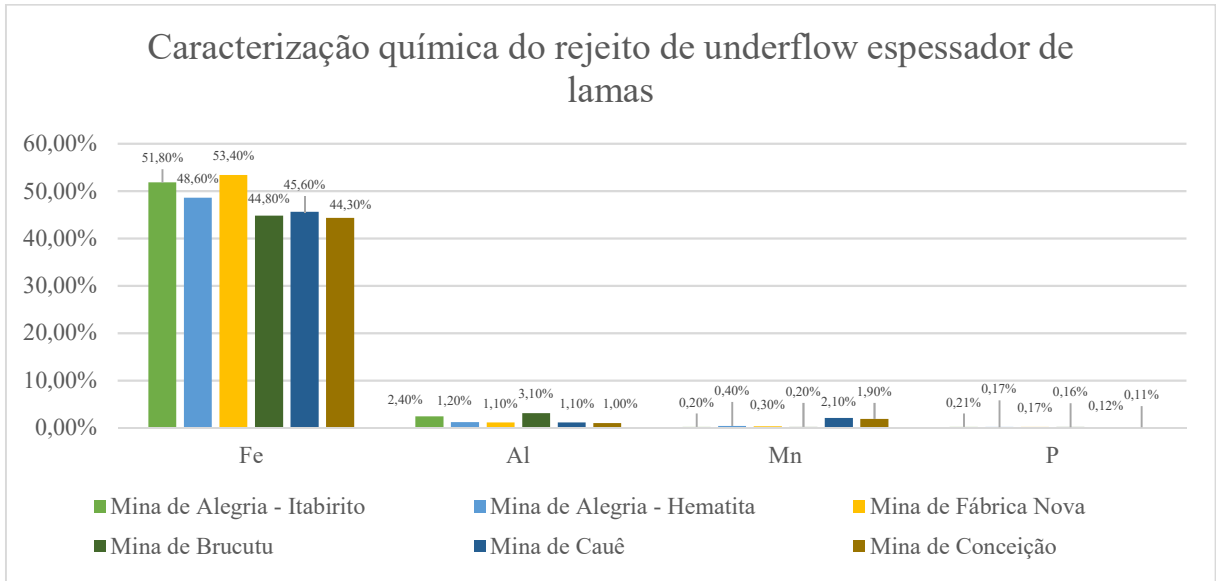
Tabela 7.1 - Diferença da composição química entre rejeitos a diferentes distâncias na praia em relação ao ponto de lançamento



Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

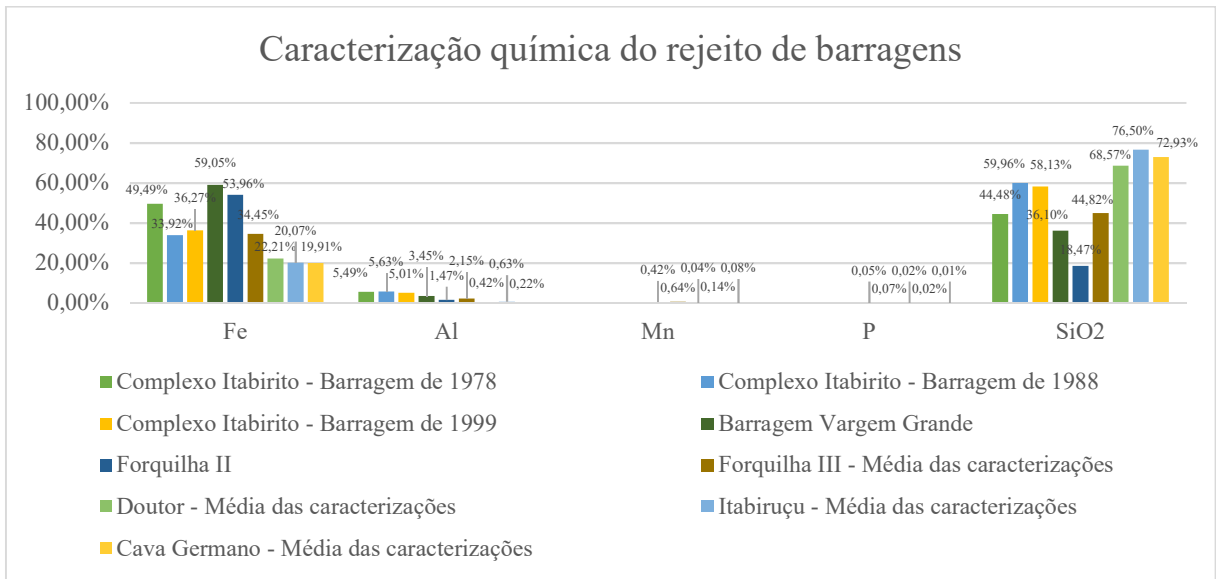
Dentre os elementos presentes na composição química dos rejeitos do Quadrilátero Ferrífero destacam-se o ferro (Fe), sílica (SiO₂), Alumínio (Al), Manganês (Mn), e fósforo (P). A presença de cada um destes nas amostras é demonstrada na Figura 7.3 e na Figura 7.4.

Figura 7.3 - Composição química dos rejeitos amostrados a partir do espessador de lammas



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 7.4 - Composição química dos rejeitos amostrados com base em coletas na praia de rejeitos



Fonte: Elaborado pelo autor

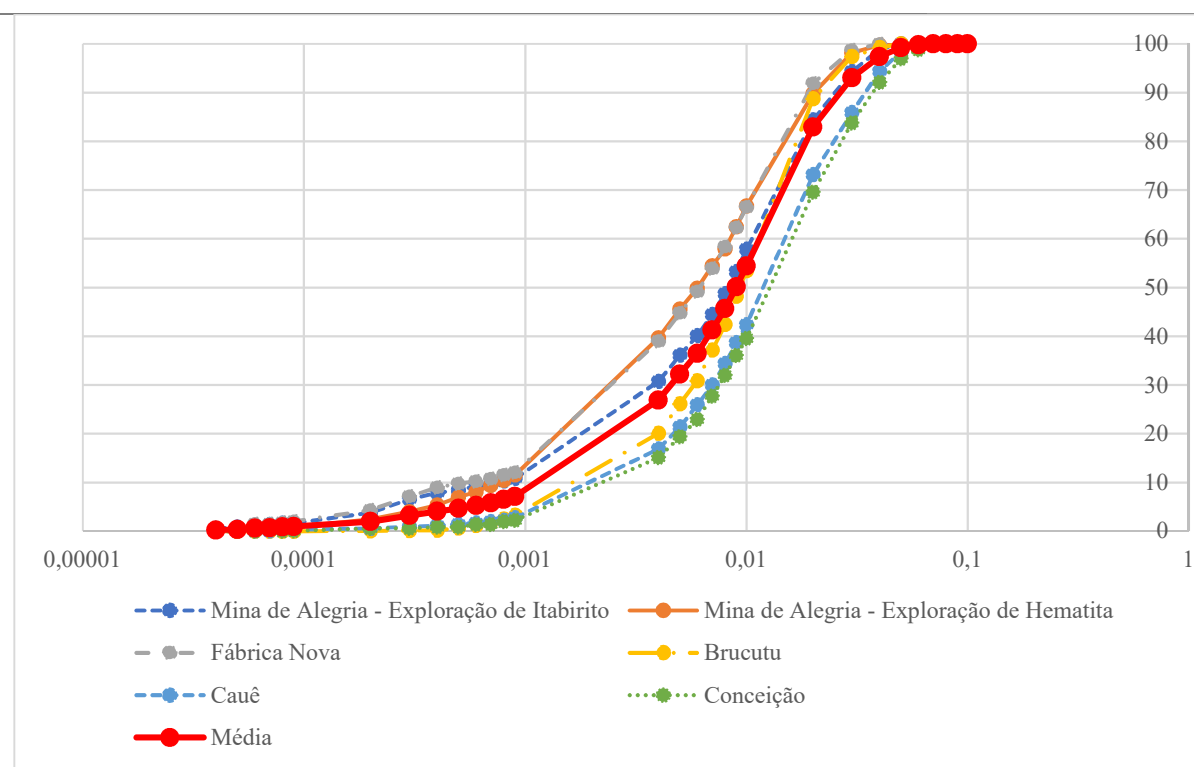
Comparando-se os resultados representados na Figura 7.3 e na Figura 7.4 das amostras retiradas do espessador de lammas e das praias de rejeito, respectivamente, identifica-se um maior teor de ferro nas amostras do espessador, fato que pode ser explicado pela segregação de material nas praias em que o ferro, por ser um material mais pesado, tende a se encontrar em regiões mais profundas.

7.2. Caracterização granulométrica dos rejeitos do Quadrilátero Ferrífero

As características granulométricas dos rejeitos podem variar de acordo com diversos fatores como tipo de material explorado, processo de beneficiamento, eficiência do beneficiamento e forma de disposição. Assim, este tópico apresentará os resultados granulométricos demonstrados neste estudo conforme origem do material, sendo estes: os rejeitos do underflow de espessador de lamas, praia de rejeito das barragens, rejeitos de empilhamentos drenados, rejeito oriundos da filtragem e seleção para empilhamento e rejeito do processo de jigagem. Os valores obtidos para algumas estruturas podem ser observados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Caracterização granulométrica dos rejeitos de underflow do Quadrilátero Ferrífero

	Pedregulho	Areia	Silte	Argila
Valor médio	-	-	73,08%	26,92%
Valor máximo	-	-	84,90%	39,68%
Valor mínimo	-	-	60,32%	15,10%



Fonte: Elaborado pelo autor

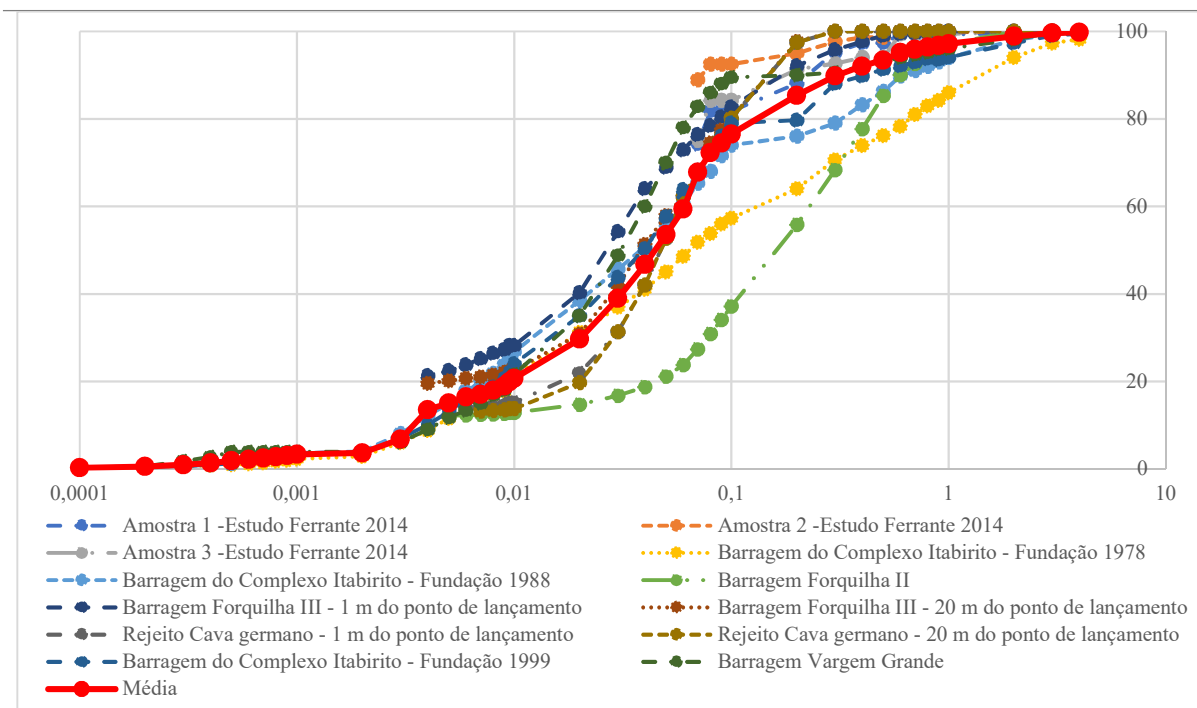
É possível identificar a influência do material explorado na caracterização granulométrica do rejeito gerado a partir dos processos produtivos nas curvas granulométricas da Tabela 7.2. As minas que se encontram no mesmo complexo, como é o caso de Cauê e Conceição, e ao complexo Itabira possuem curvas próximas, apresentando um menor teor de finos. Assim como

identificado para o complexo Itabira, o rejeito oriundo do processo de exploração de Itabirito na mina de Alegria e o rejeito da mina de Fábrica Nova também apresentam curvas próximas, com porcentagem de argila acima de 39% de sua composição. A maior variação entre o valor médio obtido para as faixas granulométricas e alguma das amostras foi de 13,39%.

Os rejeitos dispostos em barragens são direcionados por tubulações por força gravitacional ou bombeamento, com alto teor de umidade. Estes materiais, depois de dispostos, tendem a formar as praias de rejeito, locais onde o material é decantado e retoma sua forma sólida, permitindo a coleta das amostras e análise. Os tipos de rejeito contidos em barragens podem se diferenciar tanto pelo processo de disposição quanto pela estratégia adotada pelo empreendedor. Caso opte pela separação por hidrociclonagem é comum que existam regiões com disposição de rejeito arenoso (com maior condutividade hidráulica) e regiões específicas para a disposição dos rejeitos finos (lama), que são obtidos através do overflow do hidrociclone. Além disso, existe a variabilidade de material de acordo com o processo de segregação hidráulica ao longo da praia, sendo possível identificar algumas zonas de material com maior densidade. A Tabela 7.3 retrata um compilado dos valores encontrados na bibliografia a respeito das características destes rejeitos.

Tabela 7.3 - Caracterização granulométrica dos rejeitos contidos em barragens do Quadrilátero Ferrífero

	Pedregulho	Areia	Silte	Argila
Valor médio	0,22%	31,78%	64,15%	3,65%
Valor máximo	2,70%	72,60%	78,80%	4,00%
Valor mínimo	0%	11,10%	15,26%	2,90%



Fonte: Elaborado pelo autor

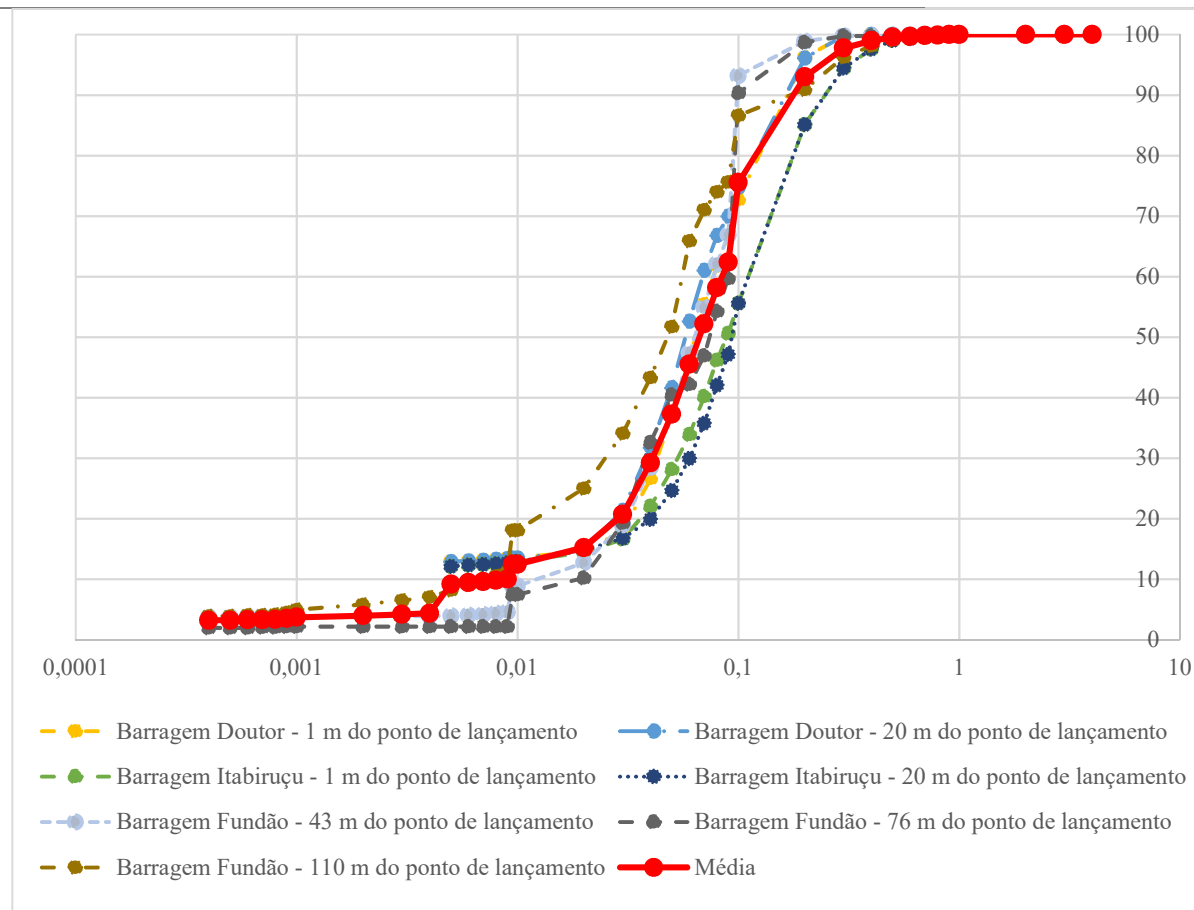
As variações granulométricas em rejeitos de barragem são comuns em regiões onde não há classificação e separação de rejeitos, desta forma essas estruturas são responsáveis pelo armazenamento do rejeito total gerado no beneficiamento do minério. A comparação dos valores obtidos na Tabela 7.3 retrata bem essa variabilidade de material encontrado neste tipo de estrutura, chegando a uma variação de 41,37% em comparação com a média obtida para o rejeito da barragem Forquilha II.

Cabe ainda destacar a granulometria das barragens Forquilha II e do Complexo Itabirito, caracterizados no estudo de Andrade (2014), e que apresentaram o material com maior granulometria e aos quais estava associado uma presença de óxido de ferro acima de 49% para ambas estruturas, indicando um processo produtivo de baixa eficiência.

Como citado anteriormente, visando a melhor utilização de áreas e estruturas, alguns empreendimentos realizam a segregação dos rejeitos totais em rejeitos arenosos e lamas. Esta prática permite um maior controle da condutividade hidráulica do material e conseqüentemente um melhor gerenciamento da estrutura. A Tabela 7.4 retrata a caracterização quanto a granulometria de alguns rejeitos arenosos armazenados em diferentes estruturas do Quadrilátero Ferrífero.

Tabela 7.4 - Caracterização granulométrica dos rejeitos arenosos do Quadrilátero Ferrífero

	Pedregulho	Areia	Silte	Argila
Valor médio	-	47,80%	48,22%	3,98%
Valor máximo	-	64,24%	65,24%	5,81%
Valor mínimo	-	28,95%	23,62%	2,19%



Fonte: Elaborado pelo autor

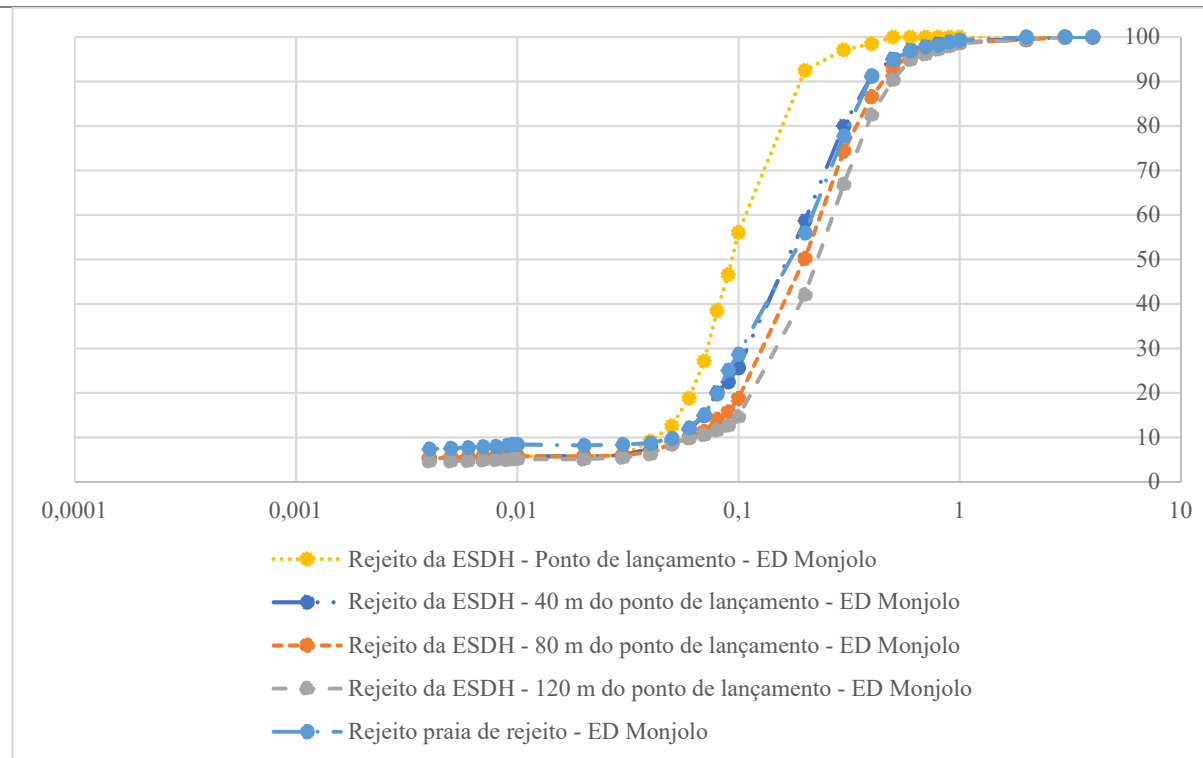
A seleção de materiais a ser disposto nas estruturas é clara quando se compara a variabilidade dos materiais caracterizados na Tabela 7.3 e na Tabela 7.4. A variação máxima obtida comparando os valores com a média granulométrica foi de 18,85%.

Nas análises obtidas do empilhamento drenado Monjolo foi identificada a caracterização a partir de um equipamento de simulação de disposição hidráulica (ESDH), que foi calibrado com os parâmetros de rejeito do empilhamento, resultando em valores compatíveis com os de campo para diferentes distâncias do ponto de lançamento. Além disso, Santos (2004) traz a caracterização do rejeito encontrado na praia do empilhamento, sendo este coletado em pontos distantes 10 metros um do outro, assim, não obtendo grandes diferenças conforme segregação

hidráulica. Uma média dos valores obtidos em campo e os valores da ESDH do empilhamento drenado podem ser visualizadas na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 - Caracterização granulométrica dos rejeitos de um empilhamento drenado no Quadrilátero Ferrífero

	Pedregulho	Areia	Silte	<0,004 mm
Valor coleta de campo	-	84,90%	7,70%	7,40%
Valor máximo	-	89,40%	21,80%	5,40%
Valor mínimo	-	72,80%	5,90%	4,70%



Fonte: Elaborado pelo autor

A curva granulométrica comparada entre os valores obtidos pela ESDH e os valores obtidos em campo comprovam que a simulação possui boa acurácia dos resultados, visto que as coletas em campo foram realizadas a 10, 20 e 30 metros de distância do ponto de lançamento, e seus resultados encontram-se próximos à caracterização do rejeito obtido para 40 metros de distância pela ESDH. É importante ressaltar que os parâmetros definidos para esta simulação foram realizados exclusivamente para o ED Monjolo, permitindo uma maior análise a respeito do comportamento hidráulico na estrutura, e em caso de utilização deste recurso para outras estruturas, os parâmetros devem ser adequados.

Os materiais dispostos em empilhamentos drenados devem ser prioritariamente arenosos, conforme demonstram os resultados obtidos, isto porque a segurança da estrutura depende de uma condutividade hidráulica adequada não somente pelos drenos como também pelo material presente nas praias de rejeito. Dentre todos os materiais analisados, este é o que apresentou maior homogeneidade, obtendo 84,90% do material coletado em campo na faixa de areia.

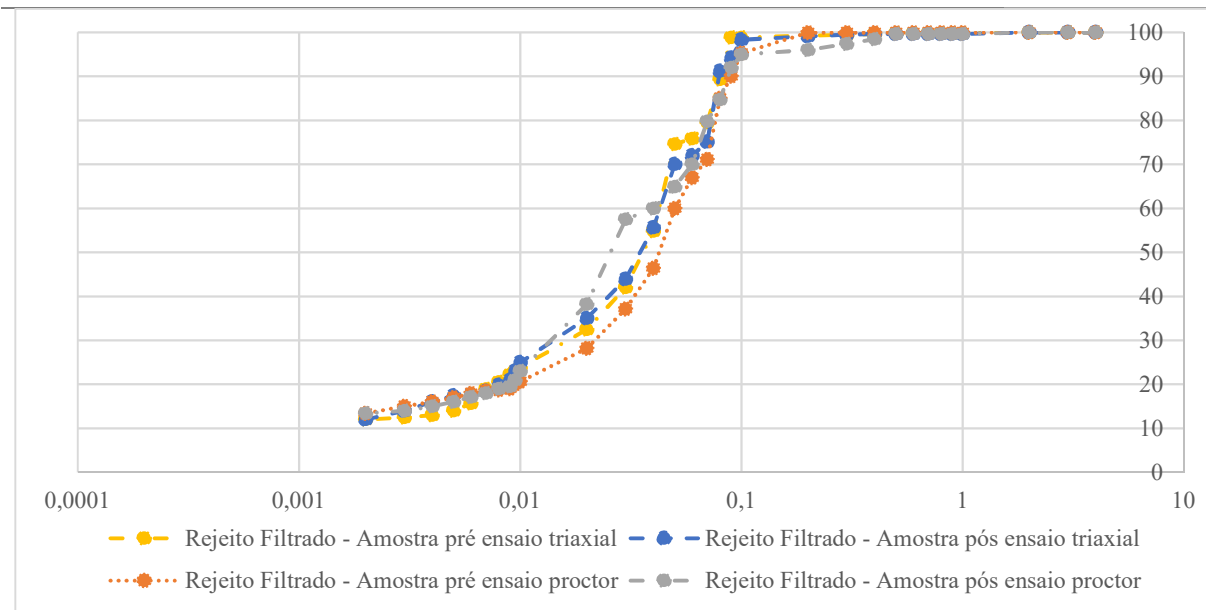
Por último, as características granulométricas de rejeitos filtrados com destino a empilhamentos são as que necessitam de maior controle e padrão. Este tipo de estrutura exige parâmetros de qualidade de compactação, granulometria e umidade bem definidas pelo projeto. Esses parâmetros são fundamentais para execução adequada e segurança da estrutura.

Com os desafios que são impostos para empilhamentos de larga escala, este tipo de estrutura exige acompanhamento rotineiro do material que está em processo de disposição.

Os resultados da Tabela 7.6 foram obtidos através do estudo publicado por Carneiro (2021), que realizou a caracterização dos rejeitos filtrados antes e depois de ensaios de compressão triaxial e proctor.

Tabela 7.6 - Caracterização granulométrica dos rejeitos filtrado no Quadrilátero Ferrífero

	Pedregulho	Areia	Silte	Argila
Valor médio antes dos ensaios	-	24,70%	62,60%	12,70%
Valor pós ensaio proctor	-	20,20%	66,40%	13,40%

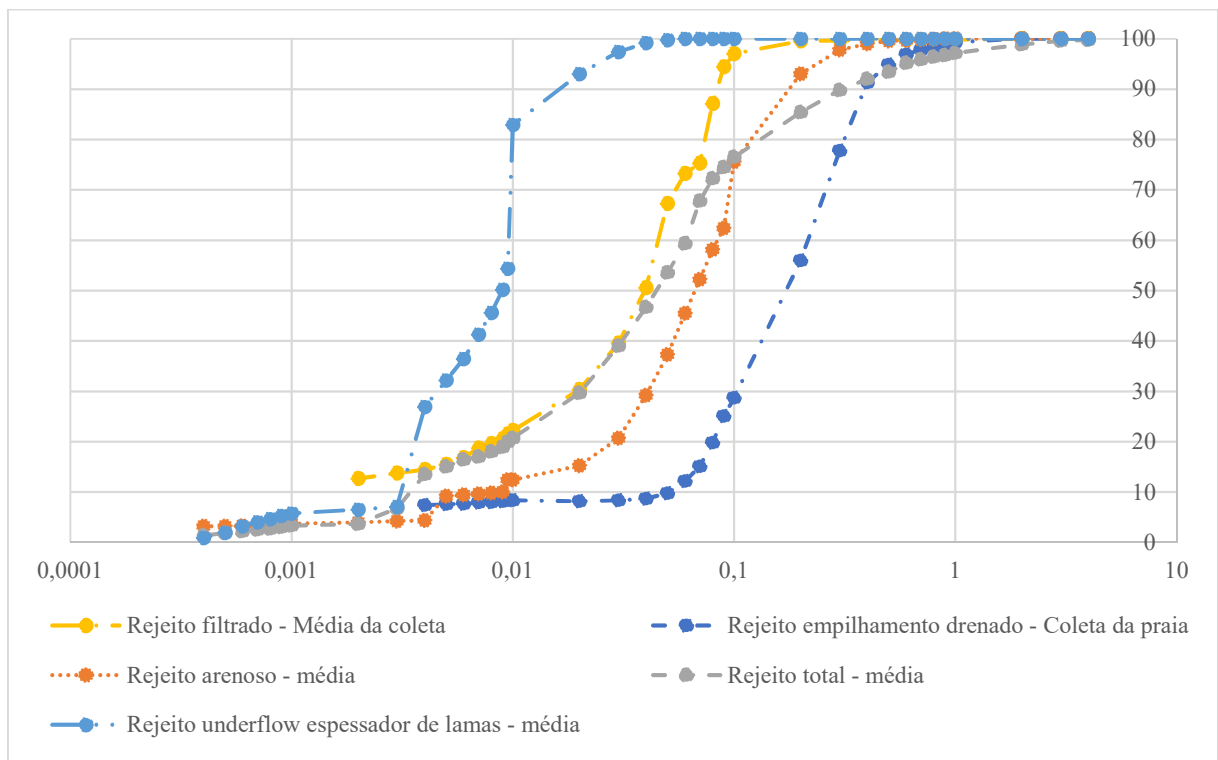


Fonte: Adaptado de Carneiro (2021)

Os resultados obtidos por Carneiro (2021) demonstram a importância do controle dos materiais após disposição nas camadas e compactação. Ambos os resultados pós ensaios apresentaram variação, com destaque para a redução do diâmetro das partículas após a execução do ensaio proctor, demonstrando aumento nas faixas de silte e argila no material. Para a segurança da estrutura é importante que sejam feitos ensaios nos materiais após a compactação das camadas, identificando possíveis quebras e alteração de parâmetro do material, permitindo assim uma correção ainda no processo construtivo.

De maneira geral, pode-se observar a grande variabilidade granulométrica que os rejeitos podem apresentar de acordo com o tipo de estrutura em que se encontram dispostos, e conseqüentemente o rigor necessário neste controle para disposição. Foi observado uma menor variabilidade da curva para os rejeitos dispostos no empilhamento drenado e de rejeitos filtrados, fato explicado pela necessidade de controle dos materiais dispostos para a garantia da estabilidade da estrutura, podendo estar associado a necessidade de maior percolação de água (sem a presença de finos) ou de parâmetros adequados conforme projeto. Na Figura 7.5 é possível observar as curvas médias obtidas para cada tipo de estrutura.

Figura 7.5 - Caracterização granulométrica média dos rejeitos do Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Elaborado pelo autor

7.3. Caracterização física dos rejeitos do Quadrilátero Ferrífero

A caracterização física de rejeitos é de grande importância para entendimento da resistência, compactidade, condutividade hidráulica e de seu comportamento na praia de rejeitos. As publicações descritas no item 6 deste trabalho realizaram caracterizações de acordo com as necessidades da pesquisa desenvolvida, assim, não existe um padrão geral da caracterização física para demonstração neste trabalho. A Tabela 7.7 retrata os valores obtidos nos ensaios de caracterização física para cada uma das estruturas obtidas nos estudos.

Tabela 7.7 - Caracterização física rejeito filtrado e alteamentos de maciços constituídos de rejeito de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero

Estrutura	w %	γ kN/m ³	γ_d kN/m ³	e_{min}	$e_{máx}$	e_{nat}	G_s g/cm ³
Forquilha II				0,74	1,63		4,80
Forquilha III – 1 metro do ponto de lançamento				0,64	1,77		3,95
Forquilha III - 10 metros do ponto de lançamento				0,57	1,59		3,81
Campo grande				0,74	1,25		4,15
Doutor - 1 metro do ponto de lançamento				0,60	1,37		3,37
Doutor - 10 metros do ponto de lançamento				0,61	1,25		3,40
Itabiruçu - 1 metro do ponto de lançamento				0,67	1,39		3,337
Itabiruçu - 10 metros do ponto de lançamento				0,67	1,37		3,411
Fundão - Maciço	14,23	20,29	17,8			0,64	
Fundão - 10 metros do ponto de lançamento	13,99	16,59	14,55			1	
Fundão - 43 metros do ponto de lançamento	17,04	17,34	14,81			0,88	
Fundão - 76 metros do ponto de lançamento	12,85	17,75	15,91			0,81	
Fundão - 110 metros do ponto de lançamento	19,22	17,13	14,43			0,94	
ED Monjolo - 10 metros do ponto de lançamento				0,58	0,99		3,14
ED Monjolo - 20 metros do ponto de lançamento				0,55	0,96		3,10
ED Monjolo - 30 metros do ponto de lançamento				0,54	0,93		3,03
Rejeito Filtrado	11,70*		21,05*	0,60	1,18		3,21

*Valor pós ensaio de compactação proctor

Fonte: Elaborado pelo autor

Assim como apresentado na Tabela 7.1, o peso específico dos grãos (G_s) está diretamente ligado à distância do ponto de lançamento do ponto em que a coleta do rejeito foi realizada. Influenciado diretamente pelo teor de ferro, este parâmetro sofre alterações conforme a segregação hidráulica do material.

Ponto importante na caracterização de materiais, o índice de vazios está ligado à granulometria encontrada em cada uma das amostras. É possível identificar que esta característica também tem relação com a segregação hidráulica, pois quanto maior a quantidade de finos presente no material, menor é o índice de vazios máximo existente.

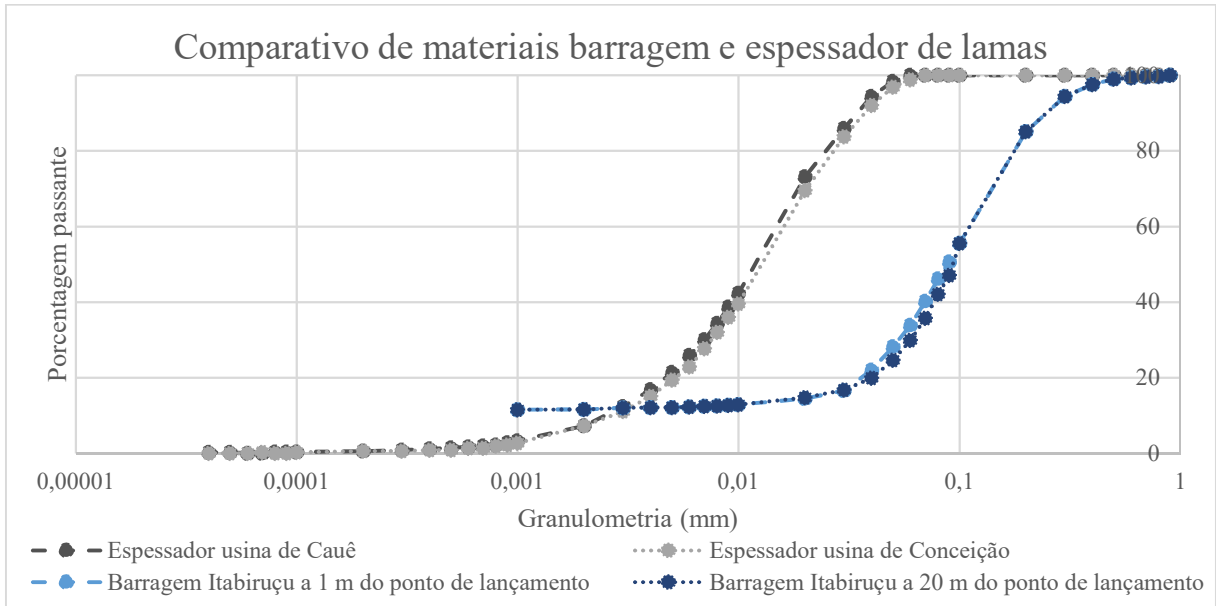
7.4. Comparativo de características dos rejeitos caracterizados após o espessador de lamas e contidos em barragens

O rejeito gerado no processo de beneficiamento em operações a úmido passa pelo espessador de lamas, equipamento que tem por finalidade a separação de material, quanto à sua granulometria, além de permitir o reaproveitamento de água na planta de beneficiamento. Após o processo, os rejeitos destinados à barragem são direcionados, por meio de tubulação (por gravidade, quando possível, ou bombeados), para as estruturas de contenção.

Com isso, as publicações de Wolff (2009) caracterizando os rejeitos oriundos do processo de espessamento de algumas minas incluindo Conceição e Cauê; e a caracterização realizada por Pereira (2005), que dentre as estruturas caracterizadas realizou a análise do rejeito contido em Itabiruçu, barragem que é alimentada pelo processo produtivo das minas de Cauê e Conceição, permite realizar um comparativo das características obtidas em cada uma das análises.

Quanto à granulometria das amostras, destaca-se os métodos de análise dos dois autores. Pereira (2005) realizou a análise granulométrica do material coletado na barragem através de peneiramento e ensaio de sedimentação, portanto, realizando a análise granulométrica com certa limitação para granulometrias mais finas, o que não impacta nos resultados necessários para aplicabilidade de seus estudos. Wolff (2009) cita que realizou análises via peneiramento para caracterização dos materiais advindos do processo de espessamento, porém, identificou que este não era efetivo para caracterização de materiais finos para as amostras coletadas. Assim, a autora utilizou granulômetro a laser para caracterização do material. A Figura 7.6 retrata as curvas granulométricas obtidas pelos autores.

Figura 7.6 - Comparativo de granulometrias espessador de lamas e barragem



Fonte: Adaptado de Pereira (2005) e Wolff (2009)

Além das diferenças de metodologias aplicadas pelos autores para a caracterização granulométrica, o que não permitiu a identificação de faixas ultrafinas para as análises das barragens, é possível visualizar que o processo produtivo das minas teve uma melhoria em relação ao aproveitamento de material, visto que o rejeito caracterizado no espessador de lamas 4 anos após a publicação de Pereira tem uma granulometria consideravelmente mais fina que a presente na barragem.

Pereira (2005) cita também em seu trabalho que os materiais dispostos na barragem Itabiruçu são os rejeitos do underflow dos hidrociclones, sendo que o overflow (rejeitos finos ou lama), na época em que o estudo foi desenvolvido pelo autor, era direcionado para a barragem Conceição. Vale ressaltar que a estrutura de Itabiruçu tem início das operações no ano de 1981, o que também impacta na presença de materiais com maior granulometria em sua composição, devido aos processos produtivos com menor eficiência.

Para a caracterização mineralógica, os rejeitos oriundos do espessador de lamas foram caracterizados via difração de raio-x, e foram identificados a presença de hematita, goethita, caulinita, quartzo, talco e moscovita para ambas as usinas, além de gibbsita, especificamente para a usina de Conceição. Na caracterização dos rejeitos advindos da barragem identificou-se a presença de hematita e quartzo para os dois pontos, além de goethita para o ponto de coleta a

20 metros do ponto de lançamento, sendo esta caracterização realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

O comparativo das análises químicas realizadas nos materiais indica algumas diferenças consideráveis nas composições químicas, principalmente com relação ao teor de ferro, conforme se apresenta na Tabela 7.8.

Tabela 7.8 - Comparativo de composição química espessador de lamas e barragem

Amostra	Fe (%)	Al (%)	Mn (%)	P (%)	SiO2 (%)	Ca ppm	K ppm	Mg ppm	Ti ppm	PPC (%)
Espessador usina de Cauê	45,6	1,1	2,1	0,12	-	584	568	715	288	-
Espessador usina de Conceição	44,3	1	1,9	0,11	-	458	231	419	247	-
Barragem Itabiruçu a 1 m do ponto de lançamento	19,18	0,6	0,14	0,01	72,1	-	-	-	-	0,14
Barragem Itabiruçu a 20 m do ponto de lançamento	20,95	0,66	0,13	0,02	80,9	-	-	-	-	0,13

Fonte: Adaptado de Pereira (2005) e Wolff (2009)

As variações de granulometria e teor de ferro entre as amostras indicam grande discrepância nos materiais analisados. Uma possível explicação para este fato é a forma de coleta das amostras na barragem. O autor não citou a qual profundidade as amostras foram retiradas, citando somente que foram amostras deformadas. Fato é que os grãos de ferro presentes em rejeitos da mineração tendem a apresentar menor granulometria, pois os grãos mais grosseiros do material são retidos na usina, além disso, por um processo de acomodação de material, estes tendem a se encontrar nas camadas inferiores das praias de rejeito devido ao peso específico de seus grãos.

Para as amostras analisadas não é possível obter uma relação entre as características. Fatores como evolução do processo produtivo, área de coleta das amostras, tipo de ensaios realizados, entre outros, influenciam diretamente nos resultados obtidos. Para este tipo de comparação, é esperada uma variação nas características dos materiais, devido ao transporte, forma de disposição na barragem, segregação hidráulica, porém, no caso dos dois estudos analisados, a variação foi muito acima dos fatores comuns ao processo.

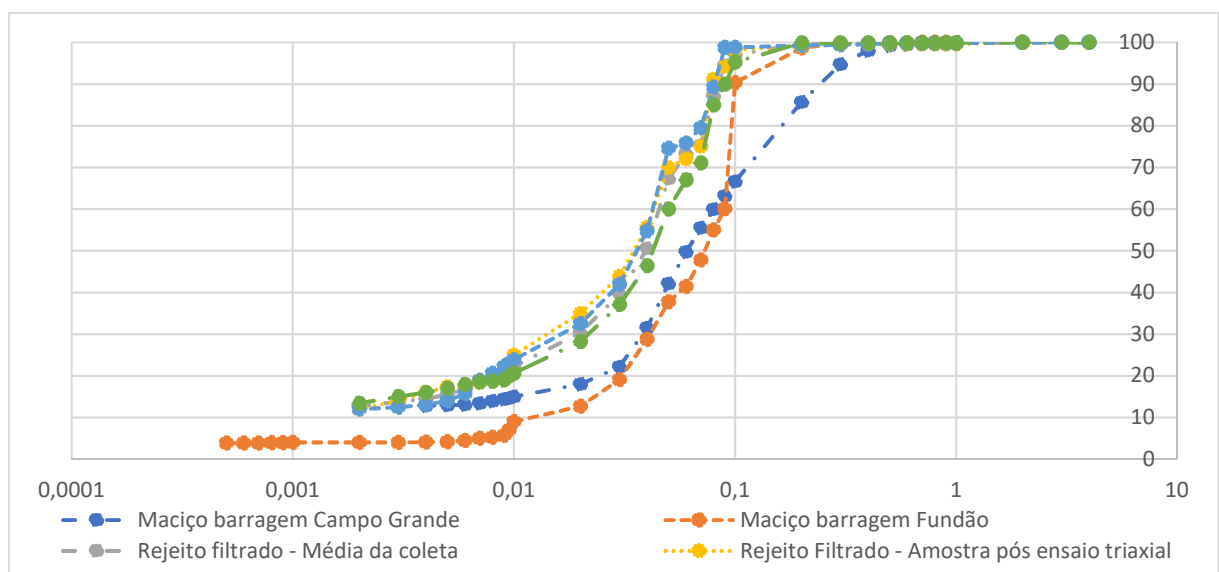
7.5. Caracterização material de alteamento de maciço utilizando rejeito e rejeitos filtrados para empilhamento

Uma das principais dúvidas a respeito das metodologias de empilhamento de rejeito filtrado é quanto à sua segurança. Por ser um método de conhecimento empírico e com base em estudos realizados para pilhas de até 100 metros, muito se questiona a respeito do comportamento característico deste tipo de estrutura em grandes volumes ao longo do tempo. Com isso, vários estudos têm sido desenvolvidos, a respeito da metodologia, visto que se apresenta como uma solução com as dificuldades de licenciamento de novas barragens no Brasil.

Para entender melhor os parâmetros de resistência do rejeito que é selecionado para o empilhamento, este capítulo traz um comparativo entre os parâmetros de resistência do rejeito filtrado descrito por Carneiro (2021) e a caracterização do maciço alteado utilizando rejeito, descrito por Rezende (2013) e Pereira (2005).

A caracterização granulométrica dos materiais é um dos principais fatores, alinhado à umidade, utilizados para selecionar os rejeitos filtrados que serão direcionados ao empilhamento ou que deverão ser dispostos em outras estruturas de contenção. Conforme apresentado na Figura 7.7, os rejeitos presentes no alteamento dos maciços apresentaram granulometria de maior dimensão, quando comparados às amostras coletadas por Carneiro (2021) na caracterização do rejeito filtrado para empilhamento.

Figura 7.7 - Caracterização granulométrica rejeito filtrado e alteamentos de maciços constituídos de rejeito



Fonte: Elaborado pelo autor

Com relação à caracterização física dos materiais que constituem os alteamentos, Pereira (2005) realizou a caracterização apenas do peso específico dos sólidos e índice de vazios máximo e mínimo; enquanto Rezende (2013) realizou uma caracterização um pouco mais completa do material. Um comparativo dos valores obtidos pelos autores com os resultados do rejeito filtrado podem ser observados na Tabela 7.9.

Tabela 7.9 - Caracterização física rejeito filtrado e alteamentos de maciços constituídos de rejeito

Estrutura	w %	γ kN/m ³	γ_d kN/m ³	e_{min}	$e_{máx}$	e_{nat}	G_s g/cm ³
Maciço barragem Campo Grande				0,739	1,245		4,152
Maciço barragem Fundão	14,23	20,29	17,8			0,64	
Rejeito filtrado	11,70*		21,05*	0,6	1,18		3,205

*Valor pós ensaio de compactação proctor

Fonte: Elaborado pelo autor

Em comparação com os rejeitos utilizados em alteamento, observa-se um menor teor de umidade no rejeito filtrado, fato explicado justamente pelo processo de filtragem adicionado no processo produtivo, que tem como um de seus objetivos a redução da umidade do rejeito. Além disso, por se tratar de um rejeito com granulometria menor, observa-se que os índices de vazio máximo e mínimo são menores que os valores encontrados para o material da barragem Campo Grande.

Com relação aos parâmetros de resistência foram realizados ensaios triaxiais drenados para o rejeito oriundo do alteamento da barragem Fundão com tensões confinantes de 75, 150, 300 e 550 kPa. Segundo citado por Rezende (2013) não foram realizados ensaios com tensões maiores por uma limitação de equipamento. O ângulo de atrito efetivo (ϕ') encontrado pela autora foi de 39,5°. Para os rejeitos filtrados caracterizados foram realizados ensaios triaxiais drenados e não drenados com tensões confinantes de 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa, sendo os ensaios realizados para diferentes graus de compactação. Carneiro (2021) identificou um ângulo de atrito efetivo de 34,2°, sendo este menor que o ângulo de atrito médio dos rejeitos da barragem Fundão encontrado por Rezende (2013). Para o rejeito referente ao maciço da barragem Campo Grande, Pereira (2005) realizou ensaios triaxiais não drenados, e encontrou um ângulo de atrito efetivo de 28,75°.

Os dados obtidos pelos autores comprovam que a estabilidade de uma pilha de rejeitos depende mais do que somente os parâmetros de resistência do material. Controles a respeito do material empregado, formas de disposição, compactação, liberação de camadas e condutividade hidráulica são fatores que auxiliam na estabilidade mesmo que não alterem a resistência da pilha e reduzem a probabilidade de ocorrência de anomalias.

7.6. Reprocessamento de rejeito para obtenção de minério de ferro concentrado

A redução do teor de ferro nas lavras em exploração, associada às dificuldades encontradas para obtenção de novas áreas de disposição de rejeitos e ineficiência dos processos de beneficiamento de materiais descartados em estruturas antigas tornam o reaproveitamento de rejeito no beneficiamento de minério de ferro uma opção interessante na tratativa destes materiais. No item 6 deste trabalho foram apresentadas estruturas que possuem teor de ferro acima de 50% representando boa oportunidade para exploração deste material.

Ferrante (2014) e Gomes (2017) realizaram estudos a respeito da concentração mineral de materiais dispostos em barragens, obtendo resultados satisfatórios com relação ao teor de ferro e impurezas do material final. Ambos os estudos foram desenvolvidos para estruturas localizadas no Quadrilátero Ferrífero e serão utilizadas como comparativos com os rejeitos analisados neste trabalho.

O trabalho de Ferrante (2014) buscou caracterizar a viabilidade econômica do processo de beneficiamento do rejeito contido em barragem através da planta de concentração magnética do empreendimento. Para o processo, o material é retirado da barragem e disposto em pilhas intermediárias para secagem, após este processo o material é enviado para a usina passando por desbaste e seleção granulométrica, selecionando apenas os materiais com granulometria abaixo de 1,2 mm. Após este procedimento, o material é concentrado a partir de separador magnético de alta intensidade do tipo Jones. Com o processo de reaproveitamento realizado na mina, o estudo demonstrou uma recuperação de ferro de 46,92% resultando em um concentrado de 64,73% de Fe e 5,29% de SiO₂,

Gomes (2017) trabalhou as distintas opções de concentração de rejeitos em testes de bancada para obtenção de pellet feed fines, obtendo como melhor resultado a recuperação de ferro de 80% com teores de 65,91% de Fe e 2,70% de SiO₂. O processo executado começou pela seleção de material inferior a 0,15 mm, moagem e posterior adição de hexametáfosfato de sódio como

dispersante, a separação magnética que demonstrou melhores resultados foi realizada através do separador de alta intensidade do tipo Jones, para rejeito coletado em barragem da mina de Pau Branco e teores iniciais de 36,53% de Fe e 43,64% de SiO₂. O trabalho demonstrou que a segregação de material auxilia na pureza do produto final, porém reduz a recuperação de ferro.

Para exemplificar a possibilidade de reaproveitamento no processo produtivo do rejeito contido em estruturas, as Tabela 7.10 e Tabela 7.11 representam um comparativo dos rejeitos apresentados neste trabalho com os materiais analisados por Ferrante (2014) e Gomes (2017) antes do processo de beneficiamento.

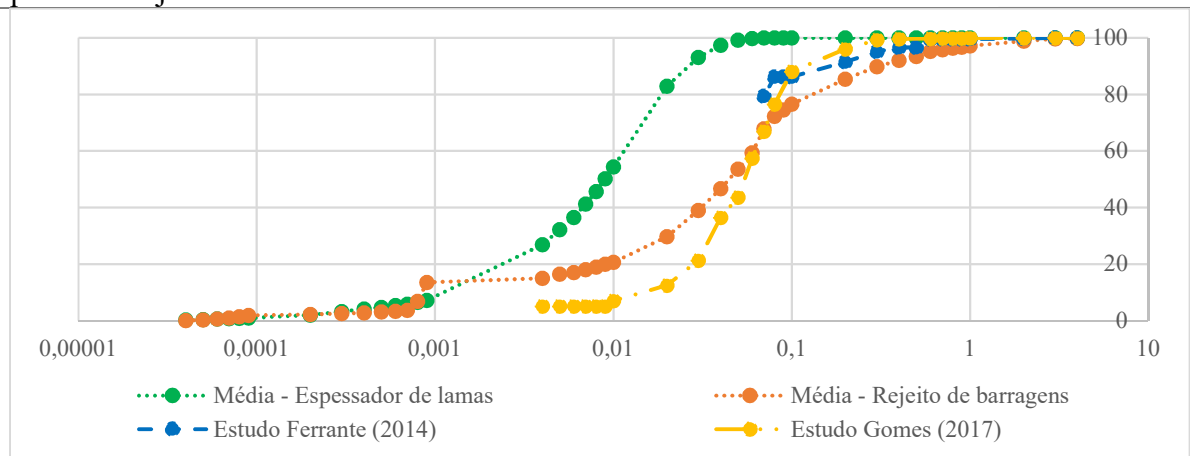
Tabela 7.10 - Composição química rejeitos reaproveitados em estudos e rejeitos apresentados no trabalho

Amostras	Fe	Mn	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PPC
Ferrante (2014)	40,77	0,17	37,87	1,66	-	2,16
Gomes (2017)	36,53	0,23	43,64	1,56	0,03	2,59
Média dos rejeitos amostrados a partir do underflow do espessador de lammas	48,08	0,85	-	1,65	0,16	-
Média dos 6 rejeitos com maior teor de ferro amostrados de barragens	44,52	0,53	43,66	3,87	0,06	-

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 7.11 - Caracterização granulométrica rejeitos reaproveitados em estudos e rejeitos apresentados no trabalho

	Pedregulho	Areia	Silte	Argila
Estudo Ferrante (2014)	-	20,6%	Sem dados	Sem dados
Estudo Gomes (2017)	-	33,02%	61,9%	Sem dados
Média do rejeito coletado após espessador de lammas	-	-	73,08%	26,92%
Média do rejeito coletado em praias de rejeito	0,39%	31,78%	52,79%	15,04%



Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar do alto percentual de ferro presente no rejeito amostrado após o espessador de lamas, a granulometria muito fina gera baixo aproveitamento neste processo pela dificuldade de separar o minério de ferro das impurezas. Gomes (2017) indica que no estudo realizado obteve resultados mais satisfatórios para rejeitos com faixa granulométrica entre 0,038 e 0,01 mm e assim, conforme se mostra na Tabela 7.11, seria possível reprocessar cerca de 45% do material caracterizado a partir do espessador de lamas com os devidos tratamentos.

Os rejeitos caracterizados a partir de coletas em barragens demonstraram características semelhantes aos rejeitos utilizados nos estudos de Ferrante (2014) e Gomes (2017) com teor de ferro médio maior que estes, o que representa oportunidade para obtenção de concentrados a partir do reprocessamento. Ressalta-se que para viabilizar este processo outros estudos devem ser realizados, como a caracterização química por faixa granulométrica, de forma a garantir a presença de ferro em teores adequados para reprocessamento, o tipo de beneficiamento mais adequado para o rejeito, a forma de transporte do material e custos com o processo.

Conforme demonstrado neste item, o reprocessamento de rejeitos pode ser uma solução economicamente interessante para o passivo ambiental existente em muitos empreendimentos de beneficiamento de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, cabendo oportunidades de estudo a esse respeito.

7.7. Utilização do rejeito de beneficiamento de minério de ferro na construção civil

Dentre as diversas formas de tornar o beneficiamento de minério de ferro uma exploração mais sustentável, a produção de areia como coproduto do beneficiamento tem se tornado atrativa para algumas plantas. Além da rentabilidade financeira de sua venda, a produção de areia para construção civil no processo de beneficiamento impacta na redução de material a ser disposto em barragens ou pilhas de rejeitos.

Pesquisas como a desenvolvida por Andrade (2014) e Pedroso (2020) buscam a caracterização de rejeitos identificando possibilidades de utilização deste na construção civil, reduzindo o passivo ambiental da mineração. O processo de beneficiamento de minério de ferro é propício para a produção de coprodutos a partir do rejeito pois gera materiais com características granulométricas e químicas bem definidas. Além disso, o beneficiamento de minério de ferro não utiliza resíduos contaminantes ao ambiente, realizando somente a concentração dos minerais existentes, diferente do beneficiamento de outros minérios, como ouro, por exemplo.

Como exemplo, a mineradora Vale constituiu uma nova empresa que realiza produção de areia para venda nas minas de Brucutu, localizada em São Gonçalo do Rio Abaixo-MG; e Viga, em Congonhas-MG. Atualmente, há uma tendência do órgão responsável pelo licenciamento ambiental de estruturas de contenção de rejeitos de exigir estudos de alternativas tecnológicas que comprovem que não há possibilidade de reutilização de, pelo menos parte dos rejeitos, em outros usos.

Um dos pontos principais para utilização de materiais como agregado miúdo de concreto é a classificação granulométrica. A ABNT NBR 7211:2022 traz as características necessárias que um material deve atender para poder ser utilizado como agregado (seja ele graúdo ou miúdo), e as caracterizações granulométricas limitantes podem ser observados na Tabela 7.12 e Tabela 7.13.

Tabela 7.12 - Limite superior e inferior de granulometria do agregado miúdo conforme ABNT NBR 7211:2022

Abertura de malha (mm)	Porcentagem de massa retida			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5	0	0	0	0
6,3	0	0	0	7
4,75	0	0	5	10
2,36	0	10	20	25
1,18	5	20	30	50
0,6	15	35	55	70
0,3	50	65	85	95
0,15	85	90	95	100

Fonte: ABNT (2022)

Tabela 7.13 - Módulo de finura para utilização de material como agregado miúdo conforme ABNT NBR 7211:2022

Módulo de finura	
Utilizável inferior	Entre 1,55 e 2,20
Ótimo	Entre 2,20 e 2,90
Utilizável superior	Entre 2,90 e 3,50

Fonte: ABNT (2022)

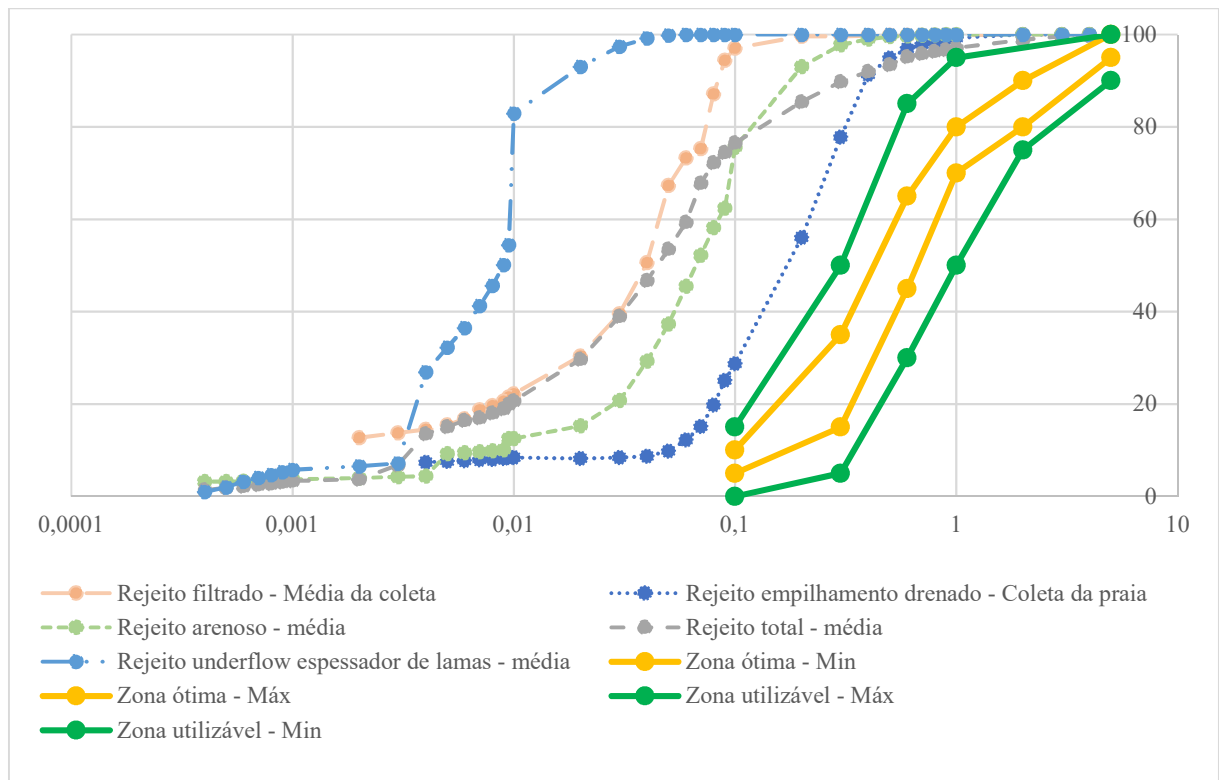
O módulo de finura é calculado a partir do somatório das porcentagens de material acumulado nas peneiras classificadas na série normal da ABNT NBR 7122:2022, quais sejam: 75mm, 37.5mm, 19mm, 9.5mm, 4.75mm, 2.36mm, 1.18mm, 0.6mm, 0.3mm, 0.15mm dividido por 100. A norma estabelece ainda, com relação à granulometria, que os agregados miúdos não

devem possuir mais de 5% do material passante nas peneiras de 0.075mm para utilização em concretos sem desgaste superficial; e para a utilização em qualquer tipo de concreto se torna mais restritiva, sendo permitido somente 3% de material passante na peneira de 0.075mm.

Apesar do limitante de finura, Andrade (2014) cita que diversos autores trabalharam rejeitos com porcentagens granulométricas expressivas abaixo dos 0.075mm para utilização em aditivos de concreto, fabricação de argamassa, incorporação em materiais cerâmicos e filler para material asfáltico.

Com relação aos limites ótimos e utilizáveis estabelecidos pela NBR 7211:2022, as análises granulométricas médias obtidas neste trabalho não se enquadram nos padrões requeridos, conforme demonstrado na Figura 7.8 e na Tabela 7.14. Uma das explicações para o não atendimento a este quesito é que uma das etapas do beneficiamento de ferro é a cominuição, não permitindo a passagem de materiais grosseiros para outras etapas do beneficiamento. A existência de materiais com grandes granulometrias nas barragens pode indicar falha no processo de beneficiamento mineral.

Figura 7.8 - Análise granulométrica das faixas ótimas e utilizáveis de agregados miúdos conforme NBR 7211:2022 com as médias de granulometria obtidas



Fonte: Elaborado pelo autor

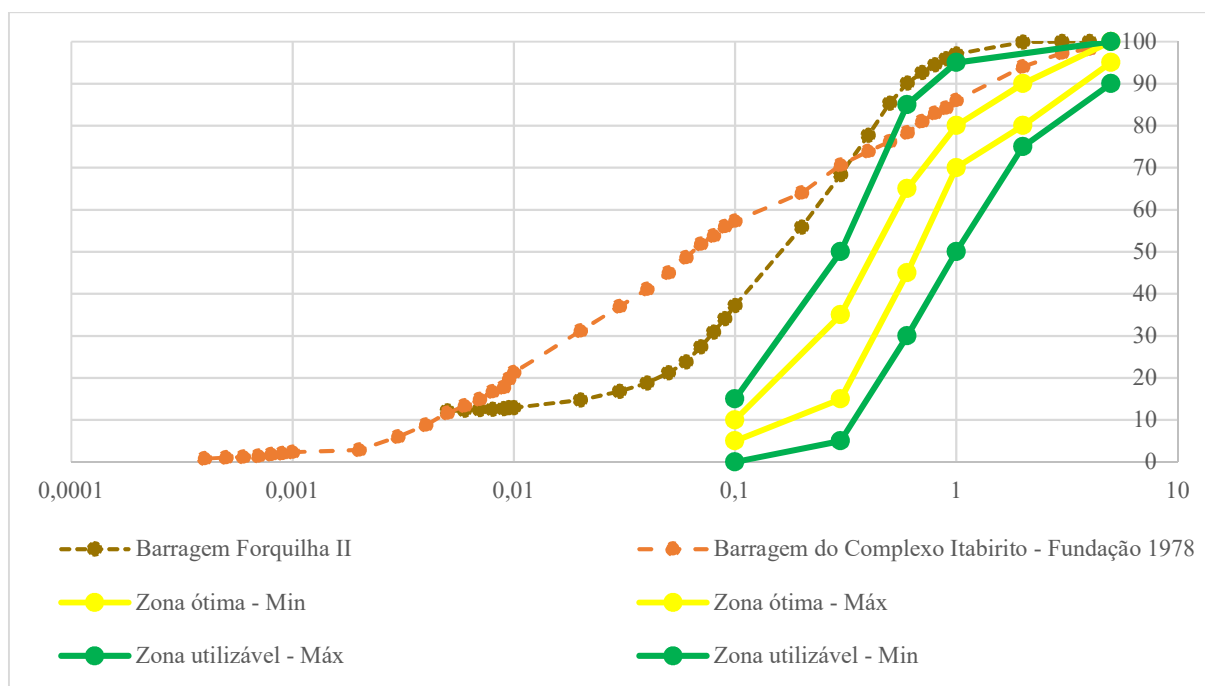
Tabela 7.14 - Módulo de finura conforme NBR 7211:2022 com as médias de granulometria obtidas para cada tipo de estrutura

Rejeito filtrado - Média da coleta	Rejeito empilhamento drenado - Coleta da praia	Rejeito arenoso - média	Rejeito total - média	Rejeito underflow espessador de lammas - média
0,04	0,97	0,27	0,43	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando os rejeitos individualmente, as amostras que mais se aproximaram das características granulométricas necessárias foram as da barragem Forquilha II e do Complexo Itabirito, conforme demonstrado na Figura 7.9 e na Tabela 7.15.

Figura 7.9 - Análise granulométrica das faixas ótimas e utilizáveis de agregados miúdos conforme NBR 7211:2022 comparado a rejeitos de estruturas



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 7.15 - Módulo de finura conforme NBR 7211:2022 rejeitos de estruturas

Barragem Forquilha II	Barragem do Complexo Itabirito - Fundação 1978
1,074	1,156

Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar da análise demonstrar que os rejeitos sem tratamento não atendem aos requisitos para utilização como agregado miúdo, a seleção de parte do rejeito para venda como areia é uma das

opções passíveis de adoção por algumas empresas como, por exemplo, atualmente pela Vale em algumas de suas unidades, como anteriormente mencionado, transformando este em um coproduto comercializável. Com isso, foi realizada a análise do percentual de material com possibilidade de aproveitamento como agregado após segregação, adequando a curva granulométrica às faixas especificadas na norma. As curvas de adequação dos materiais e análise do módulo de finura podem ser observadas no Anexo A deste trabalho, sendo o resumo dos dados obtidos na Tabela 7.16.

Tabela 7.16 - Quantidade de rejeito com possibilidade de reaproveitamento como agregado miúdo

Amostra de rejeito	Quantidade de rejeito com possibilidade de utilização como agregado miúdo			
	Zona utilizável (%)	Granulometria mínima	Zona ótima (%)	Granulometria mínima
Rejeito de barragem - Estudo Ferrante (2014) – Amostra 1	11,9	0,2	4,8	0,3
Rejeito de barragem - Estudo Ferrante (2014) – Amostra 3	15,8	0,1	NA	NA
Rejeito de barragem - Complexo Itabirito - 1978	51,4	0,06	46,2	0,08
Rejeito de barragem - Complexo Itabirito - 1988	32	0,08	27,2	0,095
Rejeito de barragem - Complexo Itabirito - 1999	27,5	0,08	NA	NA
Rejeito de barragem - Vargem Grande			12,0	0,09
Rejeito de barragem - Forquilha II	62,79	0,1	NA	NA
Rejeito de barragem - Empilhamento Drenado Monjolo	22,2	0,3	NA	NA

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme demonstrado, parte dos rejeitos contidos em estruturas no Quadrilátero Ferrífero tem potencial econômico na produção de agregado miúdo, com destaque para os materiais da barragem Forquilha II e da estrutura de 1978 do complexo Itabirito. Os rejeitos citados no trabalho que não foram inseridos na Tabela 7.16 não atingiram os parâmetros mínimos requeridos na NBR 7211:2022 para utilização como agregado miúdo.

Para os materiais que se adequaram a zona utilizável, Costa, Gumieri e Brandão (2014) apresentaram a utilização destes materiais na fabricação de pisos pré moldados de concreto, indicando que a utilização do rejeito como agregado na sua produção aumentou o peso do material, sendo ideal para utilização direta em contato com o solo.

Andrade (2014) indicou em seu trabalho a oportunidade de otimização de reutilização de rejeito através da classificação de materiais, destinando parte do rejeito como agregado miúdo para construção, e a fração de menor, pós classificação, poderia ser utilizada como aditivo em produção de cimento, agregado para argamassas, fabricação de cerâmica ou filler para concreto asfáltico com a necessidade de verificação dos aspectos químicos para aplicação nestes materiais. Mendes (2019) utilizou rejeitos do beneficiamento de minério de ferro com granulometria menor que 0,3 mm associados à argila amarela e argila cinza para a produção de tijolos de vedação.

Outra solução para a destinação de rejeitos e redução da necessidade de áreas de disposição foi proposta por Pedroso (2020), no qual a autora realizou ensaios com a utilização de rejeito de minério de ferro associado a lodo de anodização de alumínio, resíduo de concreto e resíduo da produção de cal para a verificação das condições de resistência e permeabilidade necessárias para a produção de blocos de concreto (paver) e tijolos, e identificou que as amostras com maior percentual de rejeito de minério de ferro apresentaram maior resistência ao cisalhamento.

As soluções propostas por Andrade (2014), Mendes (2019) e Pedroso (2020) permitem melhor aproveitamento do rejeito por permitir utilização de materiais com granulometrias menores quando comparado à utilização como agregado miúdo, porém, estas soluções exigem ensaios específicos para cada um dos materiais utilizados obtendo as dosagens máximas possíveis para cada uma das finalidades.

Além da adequação das características do rejeito, parte importante no reaproveitamento deste é a viabilidade econômica do processo. Conforme apresentado por Araujo *et al.* (2020) o estudo a respeito da necessidade de adequação da planta para tratamento do material, distância e modos de transporte além da absorção de mercado são fatores fundamentais nesta tomada de decisão.

8. CONCLUSÕES

Devido à importância econômica que o beneficiamento de ferro tem para o Brasil, estudos a respeito da destinação dos subprodutos desta produção se tornam de grande relevância para o cenário nacional. Por se tratar de uma área de grande concentração de jazidas de minério de ferro, o Quadrilátero Ferrífero se torna uma região de grande importância para o desenvolvimento de estudos, visto que é a área com maior número de barragens e estruturas de contenção no país.

Muito se discute a respeito do teor de ferro presente nos rejeitos de mineração questionando a eficiência dos processos de beneficiamento, porém, uma análise importante de ser realizada é a porcentagem de ferro por faixa granulométrica existente. Ferrante (2014) apresentou em seus estudos a caracterização por faixas que permitiu a tomada de decisão para reprocessar na usina parte do rejeito, visto que as faixas granulométricas acima de 1,4 mm apresentavam teor de ferro de 60% em suas amostras.

A análise da mineralogia dos materiais apresentou hematita e quartzo em 100% dos rejeitos analisados. Os rejeitos apresentaram pouca variação de minerais em sua composição, com destaque para a goethita, que foi identificada em grande parte das amostras. As análises químicas apresentaram teor de ferro variável para as estruturas, fator que sofre interferência direta da forma de disposição, pontos de coleta e processamento do minério, com destaque para o rejeito coletado na barragem Vargem Grande que apresentou teor de ferro de 59,05%.

Conforme dados levantados, a caracterização granulométrica é o aspecto que apresentou maior divergência dentre os tipos de estruturas analisadas. Foi possível demonstrar que estruturas que recebem rejeito total das usinas apresentam grande variabilidade granulométrica. A eficiência dos processos de separação, como a passagem por hidrociclones, é comprovada com o padrão de classificação granulométrica se tornando mais consistente, como é o caso dos rejeitos arenosos. Nas estruturas onde o controle granulométrico do material disposto tem influência na estabilidade e segurança da estrutura, como o caso dos empilhamentos drenados (aterro hidráulico) ou rejeitos filtrados para empilhamento, observa-se um maior padrão granulométrico, sendo identificadas menores variações com relação à média encontrada para o material.

Através dos dados obtidos foi possível identificar que, em alguns casos, rejeitos contidos em praias de barragens possuem maior ângulo de atrito efetivo que rejeitos filtrados para empilhamento. Este indicativo reforça que a estabilidade dos empilhamentos de rejeito filtrado

depende diretamente de fatores além da resistência do material disposto, como a padronização de granulometria e umidade, conforme projetado e pela operacionalidade, através da disposição e compactação das baias de forma adequada.

Parte importante para produções sustentáveis, a política dos 5 R's (reduzir, reutilizar, reempregar, reciclar e repensar) tem ganhado visibilidade no meio dos processos de beneficiamento de ferro, principalmente após a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (lei nº 12.305/2010). Para os materiais analisados neste estudo identificou-se algumas oportunidades para o emprego desta metodologia relativa à redução, reutilização e reemprego.

Com relação à eficiência dos processos de beneficiamento das minas analisadas os resultados da análise química do rejeito coletado a partir do espessador de lamas demonstraram materiais com teor de ferro acima de 50% em alguns casos, o que pode indicar a possibilidade de redução da exploração em caso de melhoria da eficiência destes processos.

Conforme demonstrado por Gomes (2017) é possível o beneficiamento de materiais com granulometria acima de 0,01 mm com eficiência satisfatória, o que representa em torno de 45% dos rejeitos caracterizados após passagem pelo espessador de lamas. Desta forma, se faz necessária uma caracterização química completa por faixa granulométrica para identificação de possibilidade de reaproveitamento de material no beneficiamento, porém o indicativo de teor de ferro acima dos 45% pode representar uma oportunidade de melhoria no beneficiamento.

A oportunidade de reutilizar os rejeitos contidos em barragens ficou clara no comparativo realizado entre os materiais demonstrados no estudo e as análises realizadas por Gomes (2017) e Ferrante (2014), nos quais demonstraram a viabilidade econômica no reprocessamento de rejeitos com teores de ferro de 36,53% e 40,77% respectivamente. Dentre as amostras apresentadas neste estudo, 5 rejeitos coletados em barragens e todos os que foram obtidos após o espessador de lamas apresentaram teor de ferro maior que o material reprocessado pelas autoras. Ressalta-se que a viabilização deste processo deve ser estudada para cada empreendimento e tipo de material.

Reempregar rejeitos da mineração em materiais da construção civil é uma das soluções encontradas por pesquisadores e empreendimentos na redução do passivo ambiental gerado pelo beneficiamento de minério de ferro. Porém, foi demonstrado nesta pesquisa que o rejeito total gerado precisa de seleção prévia para atendimento aos normativos com relação à sua

utilização. Alguns empreendimentos como a mina de Brucutu e mina de Viga já realizam a comercialização de areia oriunda do rejeito para construção civil.

O estudo permitiu avaliar a possibilidade de reaproveitamento de parte do material após seleção granulométrica para se adequar aos parâmetros da NBR 7211:2022 de utilização como agregado miúdo, o que demonstrou resultados satisfatórios, com destaque para as barragens do complexo Itabirito de 1978 e Forquilha II, que apresentaram possibilidade de aproveitamento de 51,4% e 62,79% de aproveitamento, respectivamente. É importante ressaltar que a adequação de materiais aos parâmetros depende de estudos de viabilidade financeira e aplicabilidade deste para a região e indústria.

Entender o tipo de material que se encontra disposto nas regiões, a interferência dos processos produtivos, tipos de estrutura e formas de disposição são aspectos relevantes para a tomada de decisão da destinação e possíveis soluções para os passivos ambientais gerados no beneficiamento de ferro. As oportunidades de redução através da melhoria de processos, reutilização e reemprego podem representar o futuro do processo minerário do Quadrilátero Ferrífero.

9. REFERÊNCIAS

ALVES, P. I. A. **Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens**. 115 f. 2020. - Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

ANDRADE, L. C. R. de. **CARACTERIZAÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE FERRO, IN NATURA E SEGREGADOS, PARA APLICAÇÃO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL**. 96 f. 2014. - Universidade Federal de Viçosa, [s. l.], 2014. Available at: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/6664>

ANM. **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas**. Brasília: [s. n.], 2023a. Available at: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf>.

ANM. **REPORT MENSAL BARRAGENS DE MINERAÇÃO - Março**. Brasília: [s. n.], 2023b. Available at: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/arquivos/boletim-mensal-marco-2023.pdf>.

ANM. **RESOLUÇÃO ANM Nº 95, DE 07 DE FEVEREIRO DE 2022**[S. l.: s. n.], 2022. Available at: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>

ANM. **SIGBM - Sistema de Gestão de Segurança de Barragem de Mineração**. [S. l.], 2023c. Available at: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/GerenciarPublico>.

ARAÚJO, S. R. de *et al.* Reverse logistics system applied to the reuse of iron ore tailings. **Waste Management & Research**, [s. l.], 2020. p. 9. Available at: <https://doi.org/10.1177/0734242X209>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211:2022 – AGREGADOS PARA CONCRETO – ESPECIFICAÇÃO**Brasil: [s. n.], 2022. p. 10.

CARNEIRO, J. J. V. **Characterization and behavior of iron ore tailings: the effect of compaction and stresses**. 217 f. 2021. - Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021. Available at: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/29846>

CHAVES, A. P. **Desaguamento, Espessamento e Filtragem**. 4^aed. São Paulo: Oficina de

textos, 2013.

COSTA, A. V.; GUMIERI, A. G.; BRANDÃO, P. R. G. Piso intertravado produzido com rejeito de sinter feed. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 228–259, 2014.

CRYSTAL, C.; EZAMA, I.; HORE, C. **Filter-Pressed Dry Stacking: Design Considerations Based On Practical Experience**. Keystone: Proceedings Tailings and Mine Waste 2018, 2018.

DAUCE, P. D. *et al.* Characterisation and magnetic concentration of an iron ore tailings. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 1052–1059, 2019. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.07.015>

DAVIES, M. Filtered Dry Stacked Tailings – The Fundamentals. *In:* , 2011, Vancouver. **Anais [...]**. Vancouver: Proceedings Tailings and Mine Waste 2011, 2011. p. 9.

ESTADO DE MINAS GERAIS. **Lei Nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019**. Belo Horizonte - MG: [s. n.], 2019.

FERRANTE, F. **Estudo de viabilidade para recuperação de minério de ferro em rejeitos contidos em barragens**. 85 f. 2014. - Universidade Federal de Ouro Preto, [s. l.], 2014.

FREITAS, L. da S. **Avaliação dos minérios itabiritos compactos e semi-compactos em um circuito de britagem da Samarco Mineração S/A**. 79 f. 2014. - Universidade Federal de Minas Gerais, [s. l.], 2014. Available at: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9N5H6X/1/disserta__o_lamartine.pdf

GLOBAL INDUSTRY STANDARD ON TAILINGS MANAGEMENT (GISTM). [S. l.], 2020. Available at: <https://globaltailingsreview.org/global-industry-standard/>. Acesso em: 17 nov. 2023.

GOMES, A. C. F. **ESTUDO DE APROVEITAMENTO DE REJEITO DE MINERAÇÃO**. 84 f. 2017. - Universidade Federal de Minas Gerais, [s. l.], 2017.

GOMES, R. B.; DE TOMI, G.; ASSIS, P. S. Iron ore tailings dry stacking in Pau Branco mine, Brazil. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 339–344, 2016. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.03.008>

GOOGLE EARTH. **Barragem Casa de Pedra - Google Earth**. [S. l.], [s. d.]. Available at: <https://earth.google.com/web/search/Barragem+casa+de+pedra/@-20.50054777,->

43.87343978,871.45450733a,6345.99629569d,35y,28.2808516h,0.19077854t,0r/data=Cn8aV
RJPCiMweGExNWJiNjMzYmM3ODJiOjB4YWQ1ZjlyMjgzODVhYzgzNhkvQsJBjIE0wC
FsaX-xCPFFwCoWQmFycmFnZW0gY2FzYSBk. Acesso em: 1 maio 2023.

IBAMA. **Rompimento da Barragem de Fundão: Documentos relacionados ao desastre da Samarco em Mariana/MG.** [S. l.], 2020. Available at: <http://www.ibama.gov.br/cites-e-comercio-exterior/cites?id=117>. Acesso em: 22 fev. 2023.

IBRAM. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração.** 1ªed. Brasília: [s. n.], 2016.

IBRAM. **Mineração em números.** [S. l.: s. n.], 2022a. Available at: <https://ibram.org.br/publicacoes/?txtSearch=&checkbox-section%5B%5D=1236>.

IBRAM. **Mineração em números 3T2022.** [s. l.], 2022b. Available at: <https://ibram.org.br/publicacoes/?txtSearch=&checkbox-section%5B%5D=1236>

IBRAM. **Setor mineral 1º TRIMESTRE 2021.** [s. l.], p. 27, 2021.

LUPO, J.; HALL, J. **Dry Stack Tailings – Design Considerations.** Englewood, Colorado, Estados Unidos: AMEC Earth and Environmental, 2010. Available at: <https://doi.org/10.1201/B10569-40>

MASSIGNAN, R. S.; SÁNCHEZ, L. E. O que significa descaracterizar barragens de rejeitos de mineração? Uma revisão sistemática da literatura. **Eng Sanit Ambient**, São Paulo, p. 225–234, 2022. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1413-415220200422>

MEND. **Study of Tailings Management Technologies.** [S. l.: s. n.], 2017.

MENDES, B. C. **REAPROVEITAMENTO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO, LIBERADO NO DESASTRE ENVOLVENDO O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO (MG), NA PRODUÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS.** 79 f. 2019. - Universidade Federal de Viçosa, [s. l.], 2019.

MINING ASSOCIATION OF CANADA. **Towards Sustainable Mining.** [S. l.: s. n.], [s. d.]. Available at: <https://mining.ca/towards-sustainable-mining/>

OJEDA-PEREIRA, I.; CAMPOS-MEDINA, F. International trends in mining tailings publications: A descriptive bibliometric study. **Resources Policy**, [s. l.], v. 74, p. 102272, 2021. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102272>

PAIXÃO, M. D.; WILKEN, A. A. P. Alternativas de disposição de rejeitos de mineração na

avaliação de impacto ambiental no estado de Minas Gerais. **Rev. Geogr. Acadêmica v.15, n.1**, [s. l.], p. 33–56, 2021. Available at: <https://doi.org/ISSN 1678-7226>

PEDROSO, D. E. **APROVEITAMENTO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO EM COMPÓSITOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL**. 115 f. 2020. - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [s. l.], 2020.

PEREIRA, E. L. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático**. 185 f. 2005. - Universidade Federal de Ouro Preto, [s. l.], 2005. Available at: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6039>

POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. Brasil: [s. n.], 2010. Available at: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm

PRESOTTI, E. da S. **Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro**. 109 f. 2002. - Universidade Federal de Ouro Preto, [s. l.], 2002.

REDAÇÃO ITM. **APRENDIZADO E EVOLUÇÃO NO SISTEMA DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS**. [S. l.], 2020. Available at: <https://www.inthemine.com.br/site/aprendizado-e-evolucao-no-sistema-de-disposicao-de-rejeitos/>. Acesso em: 16 fev. 2023.

REZENDE, V. A. **Estudo do comportamento de barragem de rejeito arenoso alteada por montante**. 153 f. 2013. - Universidade Federal de Ouro Preto, [s. l.], 2013. Available at: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/6991>

SAAF ENGENHARIA. **A influência dos métodos de disposição de rejeitos na segurança das barragens**. [S. l.], 2021. Available at: <https://saffengenharia.com.br/a-influencia-dos-metodos-de-disposicao-de-rejeitos-na-seguranca-de-barragens/>. Acesso em: 1 maio 2023.

SANTOS, A. G. **Influência do teor de ferro na condutividade hidráulica saturada de um rejeito de minério de ferro**. 191 f. 2004. - Universidade Federal de Ouro Preto, [s. l.], 2004. Available at: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6661>

SANTOS, A. G.; RIBEIRO, L. F. M. Condutividade hidráulica saturada de um rejeito de minério de ferro. **REM - Revista Escola de Minas**, Ouro Preto - MG, p. 465–470, 2007. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S0370-44672007000300005>

SILVA, G. P. *et al.* **CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E MINERALÓGICA DE ESTÉREIS E REJEITO DA MINERAÇÃO DE FERRO DA MINA DE ALEGRIA**,

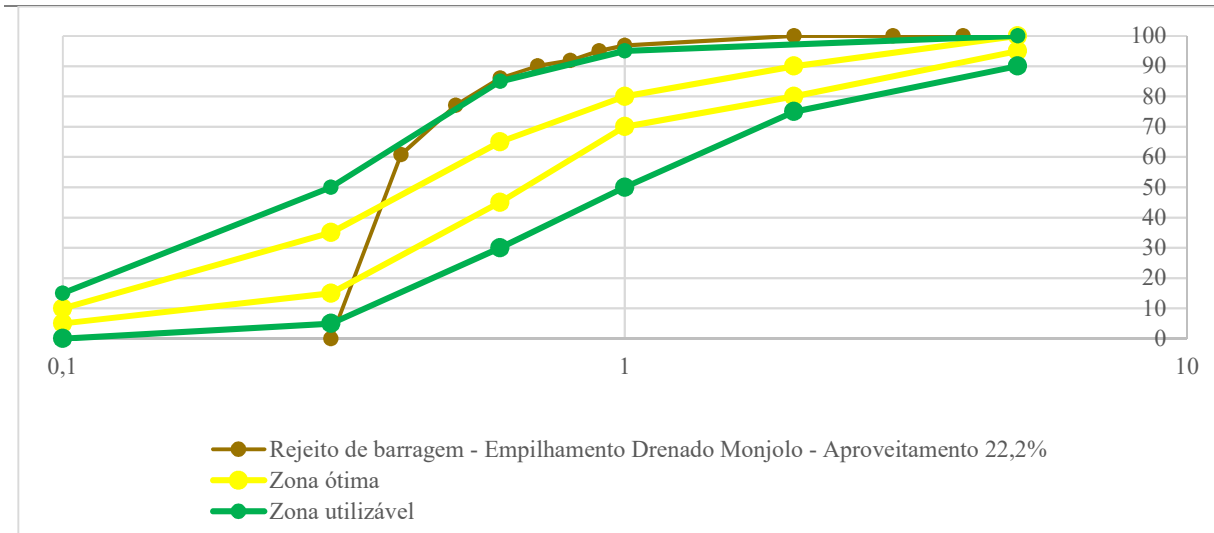
MARIANA-MG. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [s. l.], p. 45–52, 2006. Available at: <https://doi.org/e-ISSN 1983-4063>

SPINOLA, D. N. *et al.* Análise da evolução espacial da mina de Brucutú, em São Gonçalo do Rio Abaixo – MG entre 2003 e 2008 através da classificação supervisionada de imagens multitemporais Landsat 5 TM. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, p. 1551–1558, 2009. Available at: <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.00.57.42/doc/1551-1558.pdf>

WOLFF, A. P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale**. 107 f. 2009. - Universidade Federal de Ouro Preto, [s. l.], 2009. Available at: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/2345>

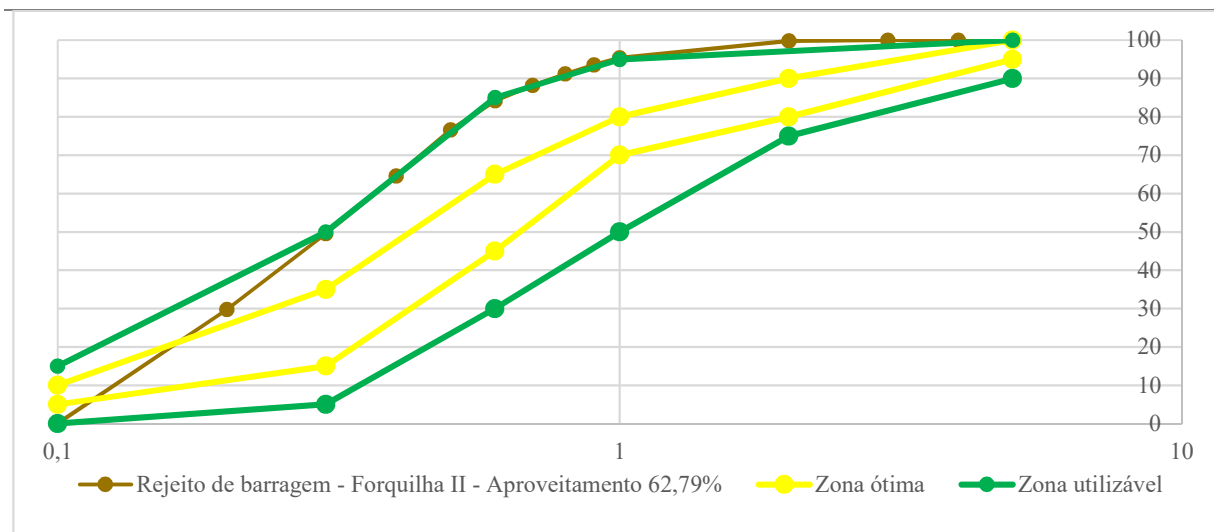
ANEXO A – Análise granulométrica e módulo de finura da adequação de rejeitos para aproveitamento como agregado

Análise peneiramento e adequação de granulometria rejeito de barragem – Empilhamento Drenado Monjolo



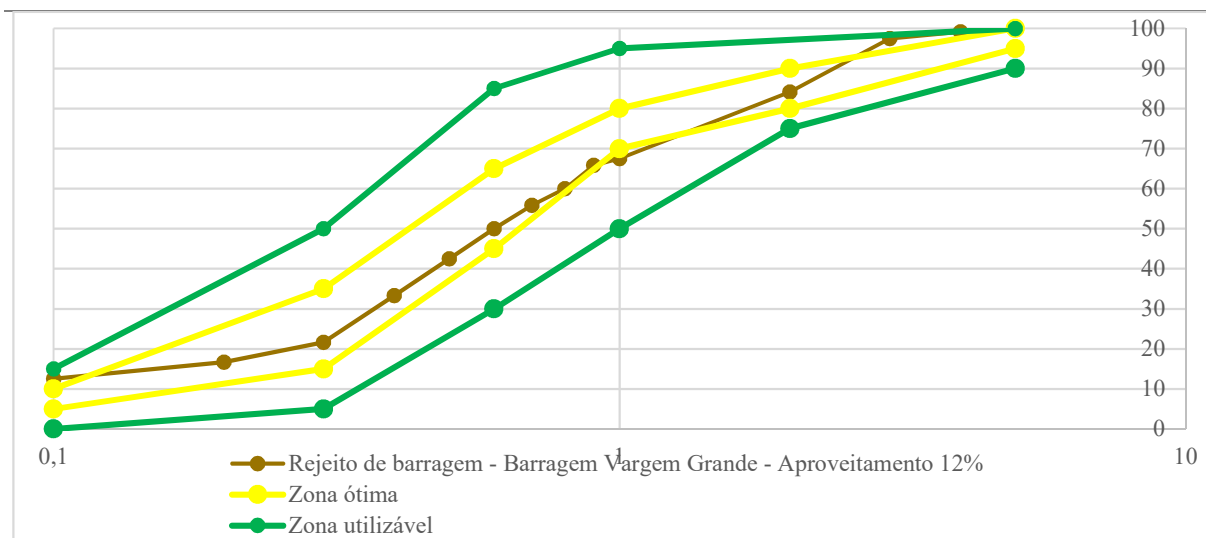
Módulo de finura	
Zona ótima	Zona utilizável
NA	2,17

Análise peneiramento e adequação de granulometria rejeito de barragem – Forquilha II



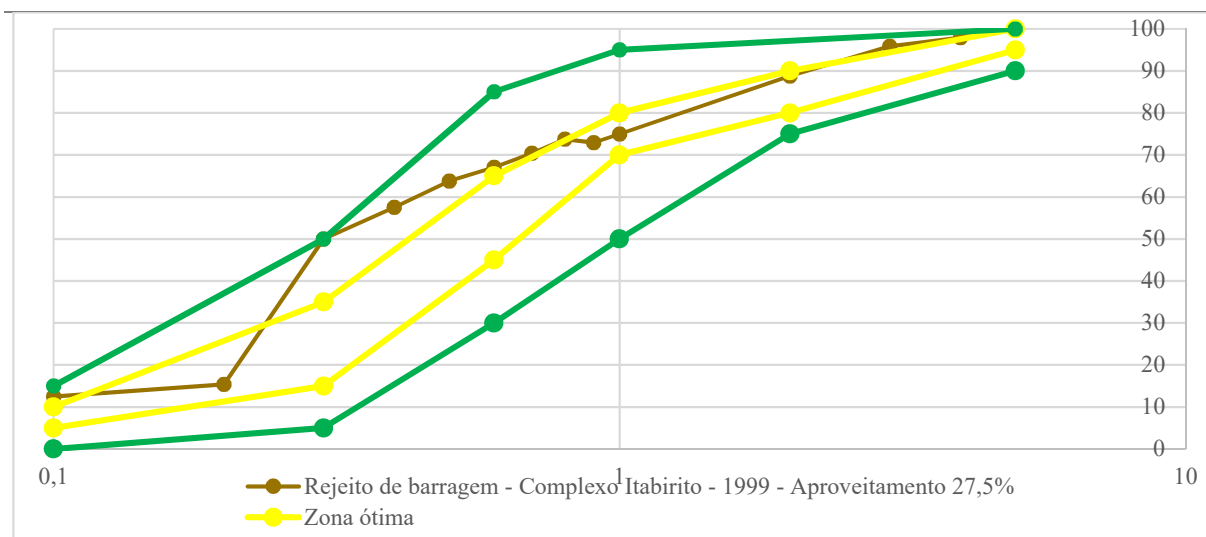
Módulo de finura	
Zona ótima	Zona utilizável
NA	1,71

Análise peneiramento e adequação de granulometria rejeito de barragem – Vargem Grande



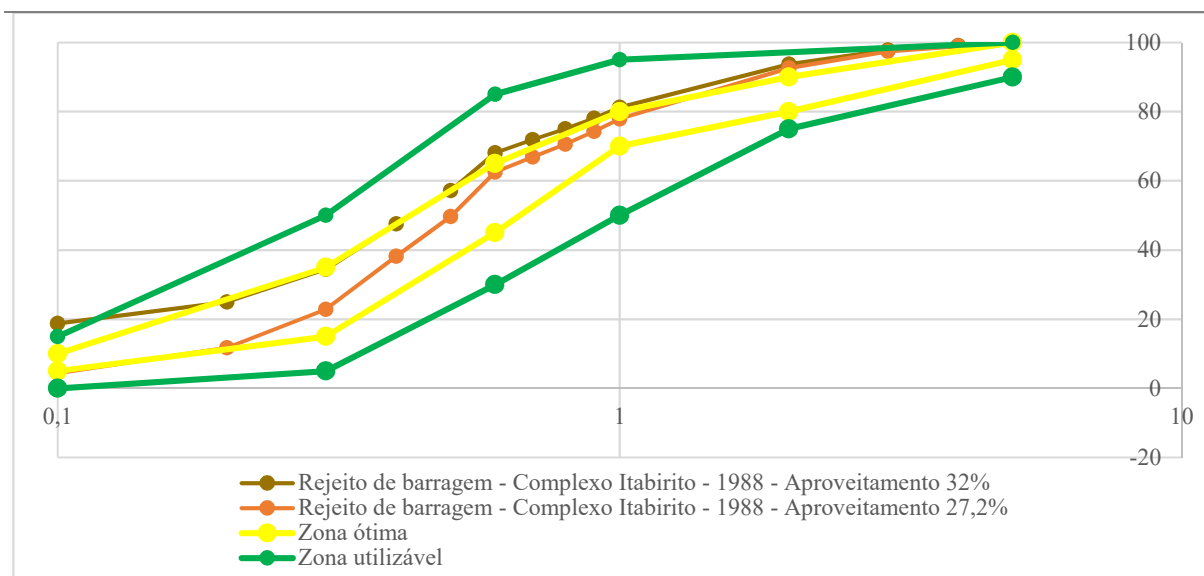
Módulo de finura	
Zona ótima	Zona utilizável
2,65	NA

Análise peneiramento e adequação de granulometria rejeito de barragem – Complexo Itabirito 1999



Módulo de finura	
Zona ótima	Zona utilizável
NA	2,09

Análise peneiramento e adequação de granulometria rejeito de barragem – Complexo Itabirito 1988



Módulo de finura

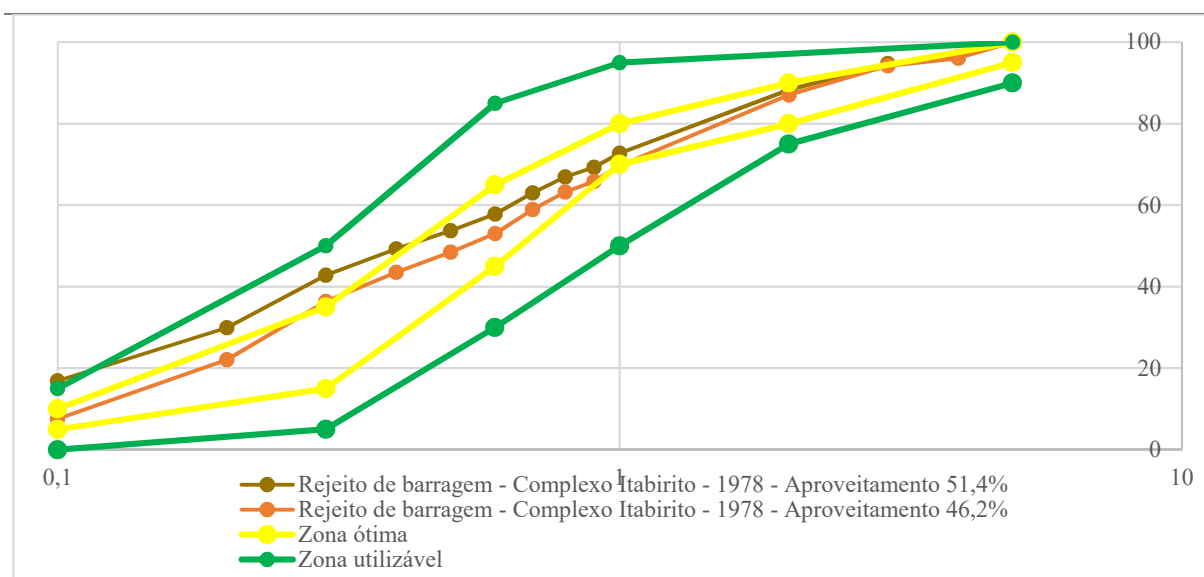
Zona ótima

Zona utilizável

2,41

2,05

Análise peneiramento e adequação de granulometria rejeito de barragem – Complexo Itabirito 1978



Módulo de finura

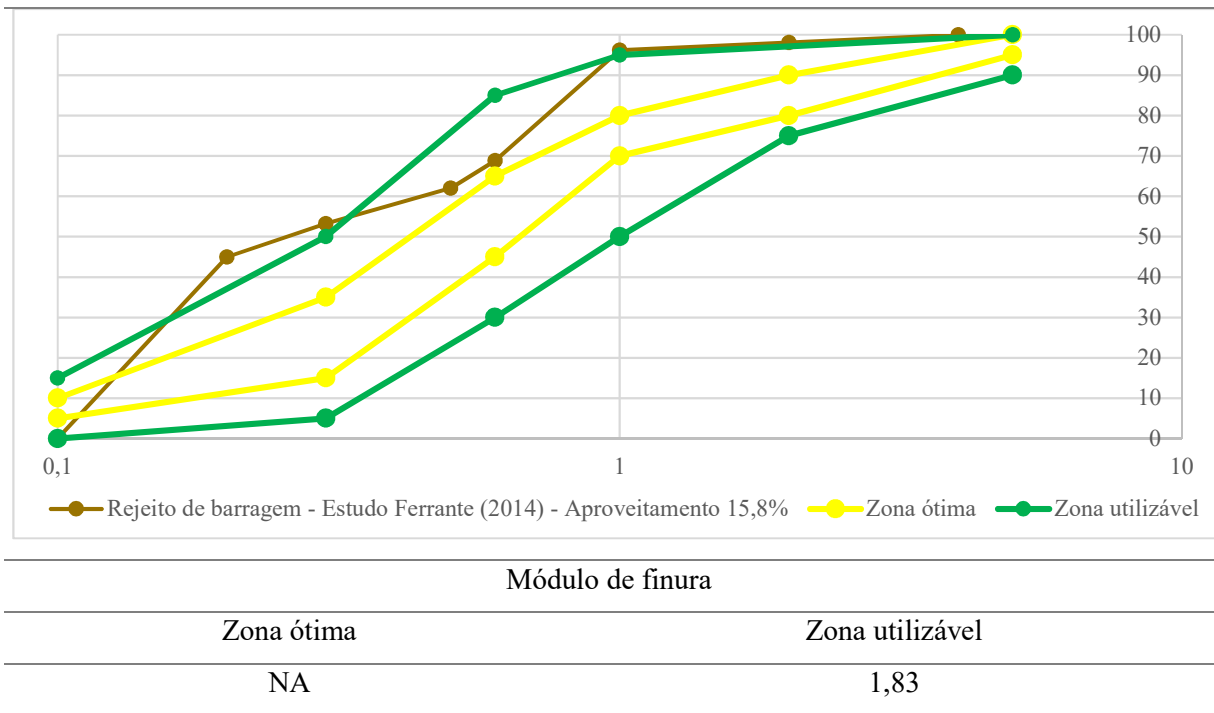
Zona ótima

Zona utilizável

2,50

2,25

Análise peneiramento e adequação de granulometria rejeito de barragem – Ferrante 2014 – Amostra 3



Análise peneiramento e adequação de granulometria rejeito de barragem – Ferrante 2014 – Amostra 1

