



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Isabella Corrêa da S. Costa

**ANÁLISE DE PARÂMETROS FÍSICOS DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO
PARA OBTENÇÃO DE CORRELAÇÕES COM PARÂMETROS DE ESTADO
CRÍTICO**

Ouro Preto

2023

Análise de parâmetros físicos do rejeito de minério de ferro para obtenção de correlações com parâmetros de estado crítico.

Isabella Corrêa da S. Costa

Trabalho Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Felipe de Campos Loch – UFOP

Coorientadores: Me. Jose Ccotohuanca – KCB; Eng. Vinícius de Casto Botelho Lanza - KCB

Ouro Preto,

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C837a Costa, Isabella Correa da Silveira.

Análise de parâmetros físicos do rejeito de minério de ferro para obtenção de correlações com parâmetros de estado crítico. [manuscrito] / Isabella Correa da Silveira Costa. - 2023.

86 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Felipe Loch.

Coorientadores: Me. Jose Ccotohuanca, Vinícius Lanza.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Rejeitos (Metalurgia) - Minérios de ferro. 2. Mecânica dos Solos de Estado Crítico (MSEC). 3. Linha de Estado Crítico (LEC). 4. Liquefação - liquefação estática. I. Loch, Felipe. II. Ccotohuanca, Jose. III. Lanza, Vinícius. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Isabella Corrêa da Silveira Costa

Análise de parâmetros físicos do rejeito de minério de ferro para obtenção de correlações com parâmetros de estado crítico

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de engenheira civil.

Aprovada em 08 de dezembro de 2023

Membros da banca

[Doutor] - Prof. Dr. Felipe de Campos Loch - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
[Mestre] - Me. Jose Ccotohuanca - Coorientador - Klohn Crippen Berger
[Doutora] - Prof.a Dr.a Daniela Antunes Lessa - Universidade Federal de Ouro Preto
[Mestre] - Me Luciano Souza - Klohn Crippen Berger
[Engenheiro] - Eng. Vinícius de Casto Botelho Lanza - Klohn Crippen Berger

Prof. Dr. Felipe de Campos Loch, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 20/03/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Felipe de Campos Loch, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/03/2024, às 18:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0681485** e o código CRC **DD988D04**.

*“Se você não gosta do seu destino, não aceite.
Em vez disso, tenha a coragem de mudá-lo.”*

Uzumaki Naruto.

AGRADECIMENTOS

À minha família por sempre me incentivar, acreditar em mim e celebrar minhas conquistas.

Aos meus orientadores por toda dedicação e comprometimento na orientação pessoal, profissional e acadêmica que vocês me ofereceram.

Aos professores do curso de Engenharia Civil da Escola de Minas pela minha formação teórica e prática ao longo da graduação. Em especial à professora Ana Letícia Pilz pela experiência incrível que tive no PET sob sua tutoria, e aos professores Marina Medeiros (do DEAMB) e Felipe Loch (do DECIV) pela jornada única que vivemos na Operação Guaicurus do Projeto Rondon.

Aos amigos incríveis que fiz na KCB por me encorajarem, por sempre se disporem a tirar minhas dúvidas e a ouvir minhas aflições, em especial Cris, Dani, Evelyn, Enzo, Jose, Luci, Mari e Vini.

Aos meus amigos da Escola de Minas que viveram ao meu lado toda a trajetória que culminou neste trabalho e por terem tornado a experiência da graduação mais leve, em especial Bruna, Carol, Elisa, Gabriel, Gizelle, Higor, João, Luiza, Marina, Marcelly, Marlon e Maysa.

Aos meus amigos de Juiz de Fora pela relação de carinho e companheirismo que a anos vem desafiando o espaço e o tempo, em especial Bruno, Fred, Laís, Lara e Júlia.

Ao Bernardo que me deu apoio de todas as formas possíveis para que eu pudesse concluir este trabalho, e todos os outros sonhos que eu me propus a realizar.

À cidade de Ouro Preto pela oportunidade de formação na Escola de Minas, entretenimento, tradição, cultura e por fazer parte da minha história.

RESUMO

Nos últimos oito anos, o Brasil testemunhou duas falhas significativas em estruturas de armazenamento de rejeito: o rompimento da Barragem de Fundão em Mariana (2015) e da Barragem I em Brumadinho (2019). Após esses incidentes, foram propostas novas medidas legislativas, introduzindo o conceito de "descaraterização da Barragem". Isso envolve a transição de uma barragem de rejeitos existente construída a montante para uma estrutura que não se caracterize mais como uma instalação de contenção de rejeitos. Além disso, as falhas também levaram a um aumento do interesse em pilhas de rejeito filtrado no Brasil, dado seu menor risco em comparação com tecnologias alternativas de manejo de rejeitos. Como parte do desenvolvimento de projetos de descaraterização e pilhas filtradas, campanhas de testes geotécnicos abrangentes foram realizadas por profissionais. O principal foco destas investigações é o estudo do comportamento mecânico de rejeitos usando as metodologias e os princípios da Mecânica dos Solos de Estado Crítico (MSEC), com a Linha de Estado Crítico (LEC) representando um meio prático de avaliar as características de resistência-deformação dos rejeitos. Um banco de dados substancial de parâmetros de estado crítico foi desenvolvido e publicado principalmente em rejeitos de minério de ferro, já que a maioria dos projetos de descaraterização de Barragens e Pilhas Filtradas estão situados no Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais) no Brasil - uma das maiores reservas mundiais de minério de ferro. As características únicas desses rejeitos, marcados pelo alto teor de ferro (ferroso) que contribui para uma alta massa específica dos grãos (Gs), tornam as correlações geotécnicas convencionais não aplicáveis sem considerações detalhadas. Este trabalho compila parâmetros de estado crítico derivados de ensaios de laboratório em 21 amostras de rejeitos de minério de ferro de vários locais do Brasil e do mundo. Esses parâmetros são então comparados com dados de ensaios de caracterização, incluindo teor de finos (%Finos), tamanho médio das partículas (D50), coeficiente de uniformidade (Cu), massa específica dos grãos (Gs), etc. O objetivo é estabelecer correlações entre dados de índice de rejeitos de minério de ferro e parâmetros do estado crítico, fornecendo uma abordagem de triagem para determinar se os resultados de laboratório estão dentro dos intervalos esperados ou se testes detalhados são necessários ao analisar a liquefação estática em Barragens de rejeitos.

Palavras-chave: Rejeitos de minério de ferro, MSEC, LEC, ensaios de índice, liquefação estática, descaraterização, rejeitos de minério de ferro.

ABSTRACT

Over the past eight years, Brazil has witnessed two significant failures in tailings storage facilities (TSF): the rupture of Fundão TSF in Mariana (2015) and TSF I in Brumadinho (2019). After these incidents, new legislative measures were proposed, introducing the concept of “TSF decharacterization”. This involves transitioning from an existing upstream-constructed tailings dam to a structure that no longer serves as a tailing containment facility. The failures also prompted increased interest in filtered TSFs in Brazil given their lower risk compared to alternative tailings technologies. As part of the development of decharacterization and filtered stacks projects, comprehensive geotechnical testing campaigns were carried by practitioners, primarily focused on studying the mechanical behavior of tailings using the Critical State Soil Mechanics (CSSM) framework with the Critical State Locus (CSL) representing a practical mean of assessing tailings strength-deformation characteristics. A substantial database of critical state (CS) parameters was developed and published primarily on iron ore tailings, as most TSF decharacterization and filtered stack projects are situated within the Iron Quadrangle (Minas Gerais) in Brazil-one of the world’s largest reserves of iron ore. The unique features of these tailings, marked by high iron (ferrous) content contributing to a high specific gravity (Gs), render conventional geotechnical correlations not applicable without detailed considerations. This work compiles CS parameters derived from laboratory testing on 21 samples of iron ore tailings from various sites in Brazil and globally. These parameters are then compared to basic laboratory data, including fines content (Fc), mean particle size (D50), coefficient of uniformity (Cu), plasticity, Gs, etc. The aim is to establish correlations between basic iron ore tailings data and CS parameters, providing a screening approach to determine whether laboratory results fall within expected ranges or if detailed tests are necessary when assessing static liquefaction of TSFs.

Key words: Iron ore tailings, CSSM, CSL, basic laboratory tests, static liquefaction, decharacterization, iron ore tailings.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Representação do arranjo das partículas em (a) solos fofos/ descompactas e (b) solos densos/ compactados. (Modificado de: UPF, 2015). 19
- Figura 2 – Fluxograma esquematizando os conceitos de solos dilatantes e solos contráteis. (Fonte: Elaborada pela autora) 20
- Figura 3 – Representação do deslocamento das partículas do solo durante a contração de volume (Fonte: Pinto, 2006). 21
- Figura 4 – Representação esquemática das tensões atuantes no solo (Modificado de: Pinto, 2006). 22
- Figura 5 – Fluxograma – Representação simplificada do fenômeno liquefação estática. (Fonte: Elaborada pela autora) 23
- Figura 6 – Causas registradas de falha em barragens de rejeito (Modificado de: Piciullo et. al., 2022) 25
- Figura 7 – Barragens registradas com CRI baixo, médio e alto no Brasil em 01/09/2023 segundo a ANM. (Fonte: elaborado pela autora) 26
- Figura 8 - Mancha de inundação provocada pela ruptura da Barragem de Fundão em 2015 (Fonte: Pedlowski, 2019) 28
- Figura 9 – Vista de satélite da região de Brumadinho antes e depois do acidente (Fonte: The New York Times, 2019). 29
- Figura 10 – Localização dos depósitos de oxido de ferro (Fonte: Carmignano *et. al.*, 2021). 30
- Figura 11 – Localização do Quadrilátero Ferrífero e suas unidades geológicas (Modificado de: Endo, 2019). 31
- Figura 12 – Fluxograma – Representação esquemática simplificada dos processos de beneficiamento do minério de ferro pelo método de flotação e os resíduos gerados em cada etapa. (Fonte: Elaborada pela autora). 32
- Figura 13 – Curvas granulométricas de rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero disponíveis na literatura (Fonte: Vieira *et. al.*, 2023). 33

Figura 14 – Representação da câmara triaxial (Palmeira, 2020).	35
Figura 15 – Estado de tensões do corpo de prova durante a fase de cisalhamento do ensaio triaxial (Modificado de: Ortigao, 2007).	36
Figura 16 – Trajetória de tensões efetivas – Metodologia Cambridge (Modificado de: Cella <i>et. al.</i> , 2021).	38
Figura 17 – Representação da reta formada pela tendência das tensões efetivas de pico e sua sua inclinação η - Trajetória de tensões efetivas – Metodologia Cambridge (Modificado de: Cella <i>et. al.</i> , 2021)	39
Figura 18 – Representação das superfícies (a) cone de Drucker-Prager e (b) pirâmide hexagonal de Mohr-Coulomb (Fonte: Garner <i>et. al.</i> , 2015).	41
Figura 19 – Representação gráfica da LEC e do estado de tensão A analisado (Fonte: Borges <i>et. al.</i> , 1998).	43
Figura 20 – Representação gráfica da LEC e do parâmetro de estado (Fonte: Gomes <i>et. al.</i> , 2022).	44
Figura 21 – Representação gráfica da Linha de Estado Crítico obtida para cinco (05) rejeitos diferentes e os pontos utilizados na calibração da equação obtidos através de ensaio de laboratório (Fonte: Macedo e Vergaray <i>et. al.</i> , 2022).	45
Figura 22 – Representação esquemática do <i>Box Plot</i> (Fonte: Neto <i>et. al.</i> , 2017).	48
Figura 23 – Fluxograma – Metodologia empregada no presente estudo. (Fonte: Elaborada pela autora).	50
Figura 24 – Curvas granulométricas (a) das 21 amostras estudadas e (b) comparadas com as curvas granulométricas de amostras de RMF apresentadas por Vieira <i>et. al.</i> , 2023. (Fonte: (a) Elaborada pela autora e (b) modificado de Vieira <i>et. al.</i> , 2023).	53
Figura 25 – Curvas granulométricas e pontos aos valores de D10, D30, D50 e D60 das 21 amostras estudadas. (Fonte: Elaborada pela autora).	55
Figura 26 – Trajetórias de tensões efetivas (a) todos os ensaios compilados e (b) em escala reduzida para melhor representação dos ensaios com nível de confinamento de até 800kPa. (Fonte: Elaborada pela autora).	57

- Figura 27 – Pontos de tensão de pico e tensão última de (a) todos os ensaios compilados e (b) em escala reduzida para melhor representação dos ensaios com menores tensões confinantes. (Fonte: Elaborada pela autora). 58
- Figura 28 – Curvas (a) Tensão Desviadora vs. Deformação axial, Deformação Volumétrica vs. Deformação axial e Excesso de Poropressão vs. Deformação axial. (Fonte: Elaborada pela autora). 59
- Figura 29 – Curvas LEC linear (Equação 11: Γ e λ_e) compiladas no banco de dados (Fonte: elaborado pela autora). 60
- Figura 30 – Curvas LEC linear (Equação 11: Γ e λ_e) compiladas no banco de dados sobrepostas as LEC de rejeitos de mineração apresentadas por Macedo, 2021. (Fonte: modificada de Macedo, 2021). 61
- Figura 31 – Curvas LEC simplificadas (Equação 12: a, b e c) compiladas no banco de dados (Fonte: Elaborada pela autora). 62
- Figura 32 – Curvas LEC simplificadas (Equação 12: a, b e c) (b) compiladas no banco de dados sobrepostas as LEC de rejeitos de mineração apresentadas por Macedo e Vergaray, 2022. (Fonte: modificada de Macedo e Vergaray, 2021). 62
- Figura 33 – Quantidade de ensaios triaxiais que embasaram a calibração de cada LEC do banco de dados. (Fonte: Elaborada pela autora). 64
- Figura 34 – *Box plot* – Parâmetros físicos – Rejeito fino. (Fonte: Elaborada pela autora). 65
- Figura 35 – *Box plot* – Parâmetros da LEC – Rejeito fino. (Fonte: Elaborada pela autora). 66
- Figura 36 – *Box plot* – Parâmetros físicos – Rejeito grosso. (Fonte: Elaborada pela autora). 66
- Figura 37 – *Box plot* – Parâmetros da LEC – Rejeito grosso. (Fonte: Elaborada pela autora). 66
- Figura 38 – Análise da relação entre os parâmetros G_s e o Percentual de Siltes, de Argila e de Finos dos rejeitos estudados. (Fonte: Elaborada pela autora). 68

Figura 39 – Histograma – Frequência dos valores de Mtc compilados das amostras de RMF classificado como fino e como grosso comparada com a apresentada por Macedo e Vergaray(2022) para rejeitos de diversos minérios. (Fonte: Modificado de Macedo e Vergaray, 2022). 70

Figura 40 – Análise da relação entre os parâmetros físicos percentual de finos, Gs, D50 e Cu e o parâmetro λ_{10} da equação da LEC dos rejeitos dos rejeitos estudados. (Fonte: Elaborada pela autora). 71

Figura 41 – Análise da relação entre os parâmetros físicos percentual de finos, Gs, D50 e Cu e o parâmetro Γ da equação da LEC dos rejeitos dos rejeitos estudados. (Fonte: Elaborada pela autora). 72

Figura 42 – Análise da relação entre os parâmetros físicos percentual de finos, Gs, D50 e Cu e o parâmetro a da equação da LEC dos rejeitos dos rejeitos estudados. (Fonte: Elaborada pela autora). 72

Figura 43 – Análise da relação entre os parâmetros físicos percentual de finos, Gs, D50 e Cu e o parâmetro b da equação da LEC dos rejeitos dos rejeitos estudados. (Fonte: Elaborada pela autora). 73

Figura 44 – Análise da relação entre os parâmetros físicos percentual de finos, Gs, D50 e Cu e o parâmetro c da equação da LEC dos rejeitos dos rejeitos estudados. (Fonte: Elaborada pela autora). 73

Figura 45 – Análise da relação entre os parâmetros físicos percentual de finos, Gs, D50 e Cu e o parâmetro c da equação da LEC dos rejeitos dos rejeitos estudados. (Fonte: Elaborada pela autora). 74

Figura 46 – Correlação entre λ_{10} e D50 obtida neste trabalho comparada com a apresentada por Hussien e Sgaoula (2023). (Modificado de: Hussien e Sgaoula, 2023). 76

Figura 47 – Correlação entre Γ e percentual de finos obtida neste trabalho comparada com a apresentada por Macedo e Vergaray (2023). (Modificado de: Macedo e Vergaray, 2022). 76

Figura 48 – Correlação entre Mtc e percentual de finos obtida neste trabalho comparada com a apresentada por Hussien e Sgaoula (2023). (Modificado de: Hussien e Sgaoula, 2023). 77

Figura 49 – Correlação entre Mtc e D50 obtida neste trabalho comparada com a apresentada por Hussien e Sgaoula (2023). (Modificado de: Hussien e Sgaoula, 2023). 77

Figura 50 – Correlação entre Mtc e Cu obtida neste trabalho comparada com a apresentada por Hussien e Sgaoula (2023). (Modificado de: Hussien e Sgaoula, 2023). 78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados sobre a produção bruta e beneficiada de minério de ferro no Brasil e em Minas Gerais em 2021 (Fonte: ANM, 2023).....	30
Tabela 2 – Caracterização física do RMF apresentada por Vieira <i>et al.</i> (2023) (Fonte: Elaborado pela autora).....	32
Tabela 3 – Amostras de RMF considerados no presente estudo, parâmetros físicos e fonte dos dados. (Fonte: Elaborado pela autora).	52
Tabela 4 – Classificação das amostras de RMF. (Fonte: Elaborada pela autora).	54
Tabela 5 – Parâmetros D10, D30, D50, D60 e Cu das amostras. (Fonte: Elaborada pela autora).....	55
Tabela 6 – Parâmetros e quantitativo de ensaios considerados na obtenção das LEC estudadas. (Fonte: Elaborada pela autora).....	62
Tabela 7 – Análises estatísticas dos parâmetros físicos Gs, D50 e Cu dos rejeitos finos e grossos. (Fonte: Elaborada pela autora).	69
Tabela 8 – R ² das tendências de percentual de finos e D50 para o rejeito fino e para o rejeito grosso. (Fonte: Elaborada pela autora).....	74
Tabela 9 – R ² das tendências de Gs e Cu para o RMF. (Fonte: Elaborada pela autora). ..	74
Tabela 10 – Tendência com boas correlações obtidas para o rejeito de minério de ferro. (Fonte: Elaborada pela autora).	75

SUMÁRIO

Lista de Figuras	VII
Lista de Tabelas	XII
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Contextualização	15
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivos específicos	16
1.3 Organização do trabalho	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Liquefação estática – conceito	18
2.1.1 Parâmetros físicos do solo	18
2.1.2 Liquefação estática	22
2.2 Importância de se estudar liquefação	24
2.3 Rejeito de minério de ferro	29
2.4 Ensaio triaxial	33
2.5 Mecânica dos solos em estado crítico	40
2.6 Análises estatísticas em tratamento de dados geotécnicos	45
3 METODOLOGIA	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1 Banco de dados	51
4.2 Análises	63
4.2.1 Representatividade da Amostragem	63
4.2.2 Identificação de <i>Outliers</i>	65

4.2.3	Índices Físicos	67
4.2.4	Relação entre a LEC e os Índices Físicos	69
5	CONCLUSÕES	79
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	80

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A mineração é um pilar econômico no país, uma atividade que propulsiona o desenvolvimento do Brasil, contribuindo significativamente para o Produto Interno Bruto (PIB) e a geração de empregos (ANM, 2023). Ao explorar o contexto nacional, a análise de dados recentes revela que o Brasil enfrenta desafios significativos relacionados à segurança de barragens. Com 33 estruturas em estado de alerta ou de emergência em setembro de 2023, a situação é agravada por 91 das barragens no país estarem classificadas com categoria de risco média e 54 com categoria de risco alta (ANM, 2023). O histórico de incidentes e acidentes, embora documentado, provavelmente subestima a verdadeira extensão do problema, devido à possíveis omissões de informações às autoridades governamentais. A revisão de casos específicos, como os eventos em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), destaca o impacto devastador da ruptura de barramentos causada pela liquefação estática, sublinhando a necessidade de pesquisas aprofundadas sobre o tema e estratégias eficazes de prevenção.

O fenômeno da liquefação estática tem suas raízes nas contribuições de renomados autores como Terzaghi e Peck, cujas publicações datam de meados do século XX (1967). Desde então, os estudos evoluíram consideravelmente, culminando na definição física do fenômeno e no desenvolvimento de metodologias para analisar a susceptibilidade de solos e rejeitos de mineração à liquefação. Em 2020, Robertson classificou o fenômeno de liquefação estática como a súbita e substancial diminuição da capacidade de resistência do solo causada por um gatilho. Apesar desses avanços, ainda persistem lacunas a serem preenchidas, tornando a liquefação estática um campo em constante evolução.

Embora tenha ganhado destaque recentemente no contexto brasileiro, evidências históricas apontam que a liquefação estática é uma preocupação antiga na engenharia, especialmente em obras de terra. Piciullo *et al.* (2022) destacam a relevância desse fenômeno ao analisar registros de acidentes de barragens em todo o mundo, revelando que desde 1915, 257 casos de ruptura foram registrados, resultando em mais de 2.650 fatalidades e mobilizando enormes volumes de

rejeitos. Esses incidentes ressaltam a importância crítica de entender e mitigar os riscos associados à liquefação estática, sendo a segunda causa mais frequente de falhas em estruturas de barramento, especialmente no cenário brasileiro com suas 925 barragens de mineração (Piciullo *et. al.*, 2022).

1.2 Objetivos

O objetivo do presente trabalho consiste na análise de parâmetros físicos e parâmetros da elastoplásticos de amostras de rejeito de minério de ferro (RMF) compiladas em um banco de dados, a fim de avaliar a existência de correlações entre estes parâmetros.

1.2.1 Objetivos específicos

- Elaborar um banco de dados representativo de amostras de RMF;
- Obter correlações para estimativa de parâmetros da LEC através da caracterização física das amostras de RMF.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho foi organizado em cinco capítulos, conforme a descrição a seguir:

O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, com uma breve contextualização acerca da importância da mineração de ferro no Brasil e os problemas que o país enfrenta quanto a segurança das barragens de rejeito. Por fim foram descritos os objetivos e objetivos específicos do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica que embasa o desenvolvimento do trabalho. Para isso, inicialmente é apresentado o conceito técnico de liquefação estática, em seguida é abordada a importância de se estudar o fenômeno e os riscos associados. Também é apresentada uma contextualização do rejeito de minério de ferro, explicitando brevemente as etapas de extração e processamento do minério, sua composição mineralógica e de seu rejeito, e a caracterização física do material. Os ensaios triaxiais, necessários para a obtenção de parâmetros elastoplásticos do material também são descritos neste capítulo. Na sequência é feita a revisão dos conceitos de mecânica dos solos em estado crítico, incluindo a obtenção da

LEC. Por fim, são revisados os conceitos estatísticos que serão utilizados no tratamento dos dados neste estudo.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia empregada no desenvolvimento do estudo.

O Capítulo 4 apresenta as análises, seus resultados e discussões. Para tal, neste capítulo é feita a apresentação do banco de dados compilado, a verificação da representatividade das amostras consideradas, a identificação de *outliers*, a análise dos índices físicos das amostras do banco de dados, e por fim é feita a verificação da existência de correlações entre os índices físicos e os parâmetros da LEC.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo obtidas dos resultados das análises. Nesse sentido, os objetivos gerais e específicos foram revisitados para avaliar a seu atendimento. Adicionalmente, foram destacados pontos de observação identificados durante a verificação de correlações entre as características físicas e os parâmetros da LEC dos RMF, seguidos por sugestões para direcionar trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Liquefação estática – conceito

2.1.1 Parâmetros físicos do solo

Para compreender o fenômeno de liquefação estática faz-se necessário analisar o comportamento das partículas que o compõem, as tensões interparticulares, as características físicas do sistema a nível microscópico e os parâmetros utilizados para descrevê-las (PINTO, 2006). O solo é um sistema constituído por partículas, entre as quais ocorre a presença de vazios ou poros. Os vazios presentes no solo são preenchidos por ar e/ou água. Desta forma o solo é caracterizado por ser um sistema trifásico (PINTO, 2006).

Certos parâmetros físicos foram definidos para quantificar e descrever as propriedades do solo analisado. Abaixo, são apresentados alguns desses parâmetros, os quais foram conceituados por Pinto, 2006:

- Índice de vazios do solo (e): parâmetro que representa a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos componentes do sistema.

Este parâmetro reflete não apenas as propriedades físicas, mas também as características do comportamento do solo, como compressibilidade, contratividade e potencial de fluxo de liquefação (CUBRINOVSKI e ISHIHARA, 2002). Um solo pode ser classificado quanto ao índice de vazios como fofo/ descompactado, quando apresenta grande relação de índice de vazios/ porosidade, ou como denso/ compactado quando apresenta pequeno índice de vazios/ porosidade, conforme representado na Figura 1 abaixo;

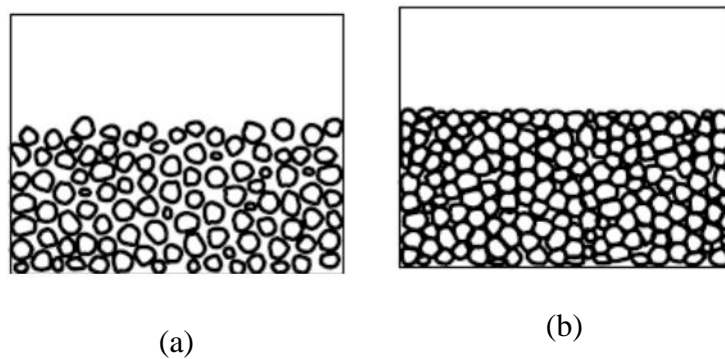


Figura 1 – Representação do arranjo das partículas em (a) solos fofos/ descompactas e (b) solos densos/ compactados. (Modificado de: UPF, 2015).

- Saturação (S_r): do solo é um parâmetro físico que representa o percentual dos poros (ou vazios) presentes no arranjo das partículas que está preenchido por água, assim, é a relação entre o volume de água e o volume de vazios.

As condições físicas que o material precisa apresentar para estar suscetível à liquefação estática incluem estar em condição quase saturada ou saturada (ROBERTSON *et. al.*, 2019).

- Densidade relativa dos grãos (G_s): é um parâmetro adimensional obtido pela relação entre o peso específico das partículas sólidas (γ_s) e o peso específico da água (γ_a) (Equação 1).

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_a} \quad \text{Equação 1}$$

- Limites de Atterberg: são os teores de umidade que definem os Limite de Contração (LC), Limite de Plasticidade (LP) e Limite de Liquidez (LL). O Índice de Plasticidade (IP) de um material é calculado como a diferença entre seu LL e seu LP. Quanto maior o IP de um material, maior é sua plasticidade resultando em uma maior compressibilidade do material.
- Diâmetro efetivo: o diâmetro efetivo D_X do material corresponde ao diâmetro em mm da peneira que retém X% da amostra ensaiada, por exemplo o parâmetro D50 corresponde ao tamanho em mm de partícula que retém porcentagem acumulada de 50% do material.
- Coeficiente de uniformidade (C_u): este coeficiente expressa o qual bem graduado é o material analisado, e é calculado pela razão entre o D60 e o D10 da amostra

(Equação 2). Solos com $Cu < 5,00$ são denominados uniformes e solos com $Cu > 5,00$ são considerados desuniformes ou bem graduados.

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Equação 2}$$

Além da caracterização segundo os índices físicos, os solos podem ser classificados segundo a sua resistência ao cisalhamento e a deformação. Para isso, Morgenstern *et. al.*, 2016 definem os conceitos de solos dilatantes e contráteis (Figura 2). O autor descreve solos dilatantes como materiais densamente dispostos que, quando submetidos à um carregamento, as partículas primeiro se afastam (dilatam) para que em seguida se movam em relação às demais. Os solos dilatantes em geral apresentam maior resistência à carregamentos. Já os solos contráteis são descritos como materiais dispostos em um arranjo de partículas soltas que, quando submetidas à um carregamento, tendem a diminuir de volume (contrair). A contratividade é um parâmetro que representa o quão contrátil é aquele solo (MORGENSTERN *et. al.*, 2016).

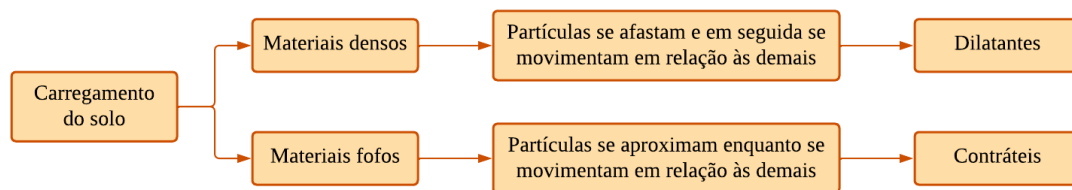


Figura 2 – Fluxograma esquematizando os conceitos de solos dilatantes e solos contráteis.
(Fonte: Elaborada pela autora)

Em uma análise microscópica observa-se que, sendo constituído por arranjos de partículas, os movimentos e fluxos dos componentes deste sistema (grãos sólidos, água e ar) resultam em atrito, este atrito é responsável pela resistência ao cisalhamento do solo (ROBERTSON *et. al.*, 2019). As partículas podem se mover sob carregamento ou descarregamento e em ambos os casos o atrito entre a superfície das partículas gera tensões cisalhantes (ROBERTSON *et. al.*, 2019). Na Figura 3 abaixo é representado o deslocamento entre partículas gerando a compactação do solo e, portanto, a diminuição de sua porosidade/ índice de vazios. Esta movimentação provoca atrito entre os grãos, que oferecem resistência ao cisalhamento entre as superfícies.

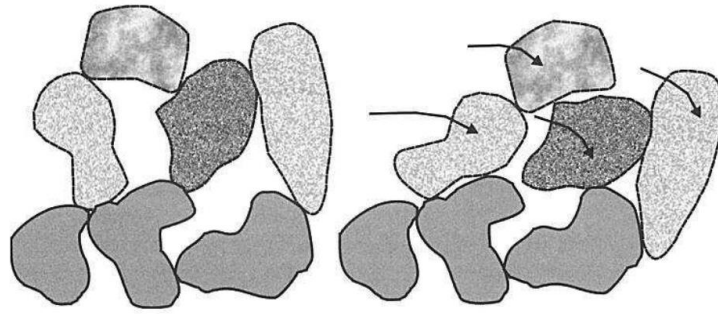


Figura 3 – Representação do deslocamento das partículas do solo durante a contração de volume (Fonte: Pinto, 2006).

Segundo Robertson *et al.* (2019), a água presente nos poros exerce nos grãos uma tensão indexada como poropressão. O peso da camada de solo acima do ponto analisado gera uma carga que é proporcional à espessura e ao peso específico do solo, chamada tensão geostática (ROBERTSON *et al.*, 2019). Ambas determinam a magnitude da tensão efetiva (normal) que há entre as partículas do solo, que é obtida pela Equação 3 (PINTO, 2006).

$$\sigma' = \sigma - u \quad \text{Equação 3}$$

Na qual:

σ' : tensão efetiva normal atuante;

$\sigma = \sigma_v = \gamma_{solo} \times z$: tensão total igual à tensão geostática;

$u = \gamma_{\acute{a}gua} \times (z - z_{N.A.})$: poropressão.

Nas quais:

γ_{solo} : peso específico da camada de solo acima do ponto analisado;

z : profundidade até o ponto analisado;

$\gamma_{\acute{a}gua}$: peso específico da água;

$z_{N.A.}$: profundidade do nível d'água.

Por sua vez, a resistência ao cisalhamento dos grãos é diretamente proporcional à tensão efetiva uma vez que quanto maior a tensão normal atuando nas partículas maior será o atrito entre elas (ROBERTSON *et al.*, 2019). A representação esquemática das tensões efetiva e de cisalhamento entre as partículas do solo é apresentada na Figura 4.

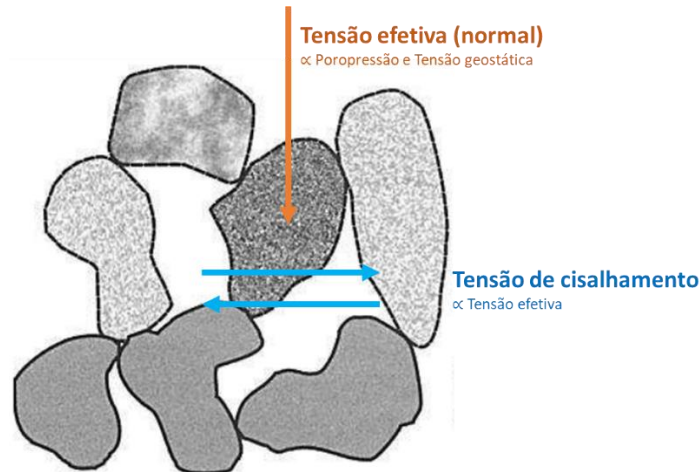


Figura 4 – Representação esquemática das tensões atuantes no solo (Modificado de: Pinto, 2006).

2.1.2 Liquefação estática

Existem duas classificações de liquefação: estática e dinâmica. Este trabalho foca na liquefação estática. Assim, quando mencionada “liquefação”, refere-se à “liquefação estática”. De forma simplificada, Robertson *et. al.*, 2019, conceituam o fenômeno de liquefação estática como sendo a perda de resistência significativa e repentina que ocorre em materiais que apresentam comportamento frágil. Terzaghi e Peck, 1967, descrevem deslizamentos de solos muito fofos, tais como as areias, como resultantes da súbita perda de resistência causada por um leve distúrbio.

Como resultado, a liquefação é caracterizada por causar deslizamentos de material ou um fluxo de lama denominado “fluxo por liquefação” (*flow liquefaction/ static liquefaction*) (ROBERTSON *et. al.*, 2019). A geometria do terreno e as características do solo determinam se a liquefação naquela estrutura resultará em deslizamento(s) ou em fluxo de material (ROBERTSON *et. al.*, 2019).

O fenômeno da liquefação pode ser desencadeado por uma carga estática ou cíclica. A liquefação estática pode ocorrer em qualquer solo com equilíbrio metaestável entre suas partículas, desde que ele esteja saturado ou quase saturado (ROBERTSON *et al.*, 2019). Segundo Machado (2021), um sistema está em um estado de metaestabilidade quando exhibe um comportamento de aparente arranjo de equilíbrio das partículas por um período prolongado, até que, eventualmente, um estímulo externo desencadeie de forma abrupta seu estado de equilíbrio real.

Esta retomada abrupta ao estado de equilíbrio real gera uma movimentação repentina no solo que induz atrito entre os grãos, gerando assim tensões de cisalhamento (ROBERTSON *et. al.*, 2019). Ainda segundo o autor, o solo fofo contrátil quando cisalhado tem a tendência de sofrer uma rápida contração de volume.

Se tratando de solo quase saturado ou saturado, os vazios estão essencialmente preenchidos por água, e, quando a contração do volume ocorre rapidamente, pode provocar um súbito aumento da poropressão pois a tensão no solo pode ser transferida para a água (ROBERTSON *et. al.*, 2019). Isso ocorre quando o cisalhamento nos grãos apresenta rapidez suficiente para que a poropressão não seja capaz de se dissipar, produzindo uma condição não drenada (ROBERTSON *et. al.*, 2019).

Portanto, é esta rápida contração do material fofo sob carregamento que provoca a perda súbita de resistência do solo durante a liquefação estática. O fluxograma apresentado na Figura 5 representa de forma simplificada os fenômenos envolvidos no processo de liquefação estática de um material.

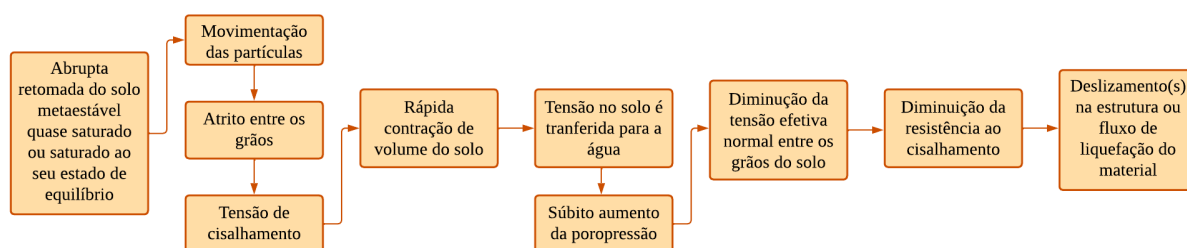


Figura 5 – Fluxograma – Representação simplificada do fenômeno liquefação estática. (Fonte: Elaborada pela autora)

Assim, segundo Robertson *et. al.* (2019), para que ocorra a perda de resistência em uma estrutura devido à liquefação estática do material, é preciso que ela apresente as seguintes condições:

- Material quase saturado ou saturado, fofo e que demonstre propensão à súbita redução de volume sob carregamento (*material contrátil*), resultando em resistências ao cisalhamento não drenadas (liquefeitas) baixas;
- Tensões de cisalhamento atuando no material maiores que sua resistência de cisalhamento não drenada;
- Ocorrência de evento(s) gatilhantes(s) (*Triggering events*) que desencadeie(m) o fenômeno da liquefação estática. Os principais são:

- Carregamentos rápidos (construção ou lançamento de rejeitos);
- Carregamentos cíclicos rápidos (sismos naturais ou vibrações causadas por detonações ou similares);
- Cargas por fadiga (detonações repetidas);
- Descarregamento (aumento dos níveis de água no solo, escavações, etc.);
- Entre outros.

2.2 Importância de se estudar liquefação

O fenômeno da liquefação estática é um objeto recente de estudo na geotecnia, cujas primeiras citações disponíveis na literatura datam da década de 1930. Embora tenha se tornado um tema de pesquisa no contexto do Brasil apenas recentemente, há registros de casos históricos que indicam que o fenômeno da liquefação é uma problemática antiga da engenharia, sobretudo em se tratando de obras de terra (ROBERTSON, 2022).

Piciullo *et. al.* (2022) elaboram uma base de dados utilizando os registros de acidentes de barragens em todo o mundo disponibilizados pelo USCOLD, UNEP, ICULD, WISE, Browke's *database*, e CSP. Desta compilação o autor conclui que desde 1915 um total de 257 casos de ruptura foram registrados no mundo, levando pelo menos 2650 pessoas a óbito e mobilizando um volume de 250 milhões de m³ de rejeitos. Em seu estudo o autor conclui que os fenômenos de liquefação estática são a segunda causa mais frequentes de falha em estruturas de barramento, representado, 16% das causas conhecidas dos casos de rompimento (Figura 6).

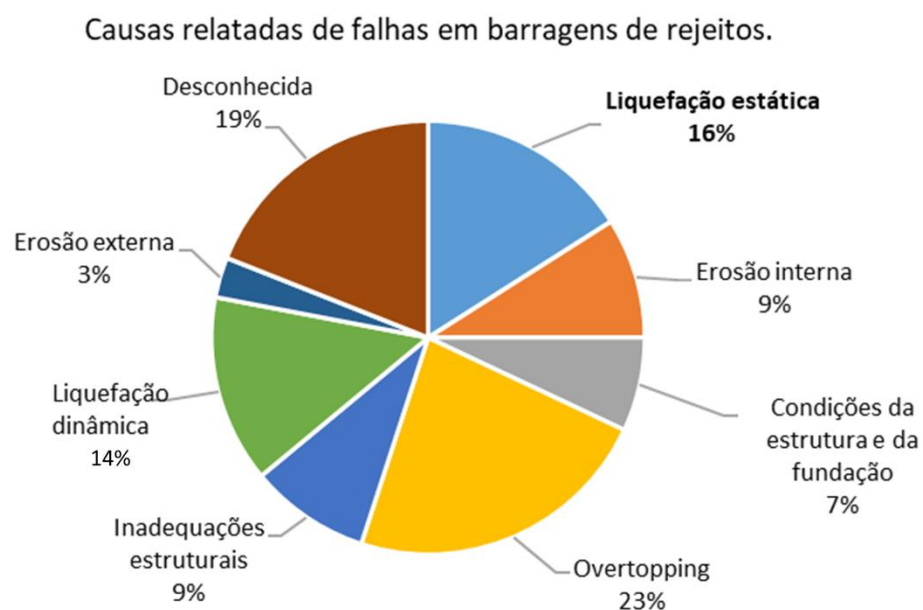


Figura 6 – Causas registradas de falha em barragens de rejeito (Modificado de: Piciullo et. al., 2022)

Tratando-se do cenário da mineração no Brasil segundo o *Report Mensal – Barragens de Mineração* emitido pela ANM em agosto de 2023, no dia 01/09/2023 no país havia 925 barragens de mineração cadastradas no Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM), das quais 456 estavam enquadradas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Segundo a ANM (2023), para uma barragem estar sujeita à PNSB, ela deve atender a pelo menos um dos seguintes critérios, considerados indicadores de possíveis problemas de estabilidade e/ou de grandes danos associados a uma eventual ruptura:

- Altura do maciço igual ou maior a 15m;
- Capacidade total do reservatório igual ou maior que 3 milhões de metros cúbicos;
- Ter um reservatório que acumule resíduos perigosos;

- Ter Dano Potencial Associado (DPA)¹ médio ou alto e/ou ter Categoria de Risco (CRI)² alta.

O Relatório Mensal (ANM, 2023) aponta que o Brasil apresenta números expressivos de barragens com CRI média (91) e alta (54) (Figura 7). Ainda é apontado que 33 estruturas se encontravam em Nível³ de Alerta ou Emergência em 01/09/2023, das quais 3 estão em Nível de Emergência 3 e 6 se encontram em Nível de Emergência 2, todas localizadas em Minas Gerais (ANM, 2023).

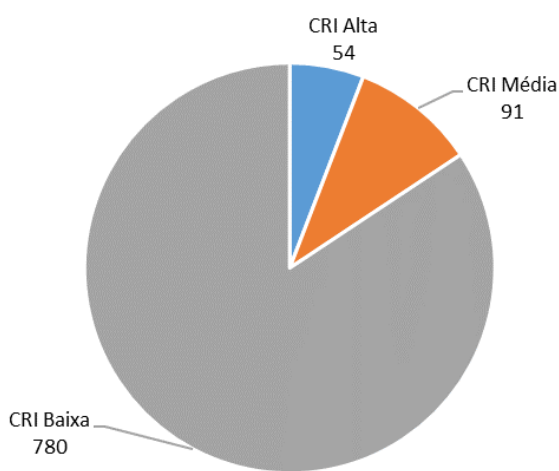


Figura 7 – Barragens registradas com CRI baixo, médio e alto no Brasil em 01/09/2023 segundo a ANM. (Fonte: elaborado pela autora)

Ao se analisar o contexto de acidentes e incidentes no Brasil, pelo menos 10 casos foram registrados e documentados no país. Entretanto, conforme elucidado pela ANA (2022), esses números tendem a subestimar a verdadeira extensão dos incidentes e acidentes em barragens,

¹ Dano Potencial Associado (DPA) é a quantificação do prejuízo causado pelo rompimento, vazamento, entrada no solo ou falha de uma barragem, sem considerar a probabilidade de que o acidente aconteça, sendo avaliado com base nas consequências para pessoas, sociedade, economia e meio ambiente. É uma das informações de classificação utilizadas no registro da estrutura no SIGBM. (Resolução ANM n° 95/2022)

² Categoria de Risco (CRI) de uma barragem pode ser baixa, média ou alta e é obtida com base nas características técnicas, no estado de conservação e na aderência à documentação de segurança definida pelo PNSB. É uma das informações de classificação utilizadas no registro da estrutura no SIGBM. (Resolução ANM n° 95/2022)

³ Nível de uma barragem pode ser de Alerta ou de Emergência 1, 2 ou 3, e é obtido com base em análises de estabilidade atualizadas e representativas da situação atual de cada estrutura, e de anomalias identificadas. É uma das informações de classificação utilizadas no registro da estrutura no SIGBM. (Resolução ANM n° 95/2022)

uma vez que a omissão de informações às autoridades governamentais pode ser uma ocorrência significativa. Os casos documentados são listados abaixo:

- Barragem da Pampulha em 1954 em Belo Horizonte – MG (Neto, 2016)
- Barragem d Açú em 1981 em Assu – RN (Vilhete, 2017)
- Barragem de Santa Helena em 1985 em Camaçari – BA (Menezes, 2016)
- Barragem do Valo Grande em 1995 em Iguape – SP (Eichler-Coelho *et. al.*, 1997)
- Barragem Camará em 2004 em Alagoa Grande – PB (Silva *et. al.*, 2006)
- Barragem São Francisco em 2007 em Miraf – MG (Monteiro *et. al.*, 2014)
- Barragem B1 em 2014 em Itabirito – MG (Coelho *et. al.*, 2021)
- Barragem de Fundão em 2015 em Mariana – MG (Morgenstern *et. al.*, 2016)
- Barragens B-I, B-IV e B-IV-A em 2019 em Brumadinho – MG (Robertson *et. al.*, 2019)
- Barragem do Carioca em 2022 em Pará de Minas – MG (Agência Brasil, 2022)

Dos casos de acidente e incidentes acima listados ao menos dois foram causados por gatilhos de liquefação, conforme classificado por Robertson (2020). São os casos das Barragens de Fundão e da Mina do Córrego do Feijão, que romperam respectivamente em 2015 e 2019. Um breve resumo destes acidentes é apresentado abaixo:

- Rompimento da Barragem de Fundão:

O acidente aconteceu no dia 05/11/2015, com o rompimento da barragem de Fundão, sob gestão da Samarco Mineração S/A, situada no Complexo Industrial de Germano, no Município de Mariana (MG). Segundo o relatório de investigação das causas do rompimento da barragem elaborado por Morgenstern *et. al.* (2016), a estrutura colapsou devido à liquefação estática dos rejeitos na ombreira esquerda da barragem. O fenômeno foi possível devido às condições de presença de rejeitos fofos e contráteis; a existência de condições de saturação; e a ruptura rápida que produziu condições não drenadas acompanhada por uma redução na resistência não drenada na estrutura (MORGENSTERN *et. al.*, 2016).

O MPF (2015) relatou que o fluxo de lama de rejeitos mobilizado após a ruptura atingiu 41 cidades em Minas Gerais e no Espírito Santo, conforme mancha de inundação apresentada na Figura 8 abaixo. Além disso, foi constatado que o incidente levou 19 pessoas à óbito, atingiu as reservas indígenas dos povos Krenak,

Tupiniquim e Guarani, provocou a degradação de 240,88 hectares de Mata Atlântica e despejou em terrenos e rios mais de 50 mi m³ de rejeitos (MPF, 2015). Por essas razões, a ruptura da Barragem de Fundão configurou o maior desastre ambiental registrado no Brasil.



Figura 8 - Mancha de inundação provocada pela ruptura da Barragem de Fundão em 2015
(Fonte: Pedlowski, 2019)

- Rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IV-A da Mina Córrego do Feijão:

No dia 25/01/2019 ocorreu na mina de Córrego do Feijão, do Complexo Paraopeba II localizado no município de Brumadinho (MG), o rompimento da barragem BI. O incidente desencadeou uma reação em cadeia, tendo por sequência o rompimento das barragens B-IV e B-IV-A, estruturas sob gestão da VALE (ESTADO DE MINAS GERAIS, 2019). Robertson *et. al.* (2019), responsáveis pela elaboração da investigação das causas do rompimento da barragem, concluiu que o rompimento e o deslizamento de lama resultante decorreram da liquefação estática dos rejeitos dentro da barragem causada pela súbita perda de resistência.

O Estado de Minas Gerais (2019) divulgou que 272 pessoas perderam a vida e 26 municípios foram atingidos pelo fluxo de lama. Em sua totalidade, foram mobilizados cerca de 12 mi m³ de rejeitos (ESTADO DE MINAS GERAIS, 2019). Assim, a ruptura das barragens B-I, B-IV e B-IV-A configuraram o acidente com maior número de vítimas registrado no Brasil.

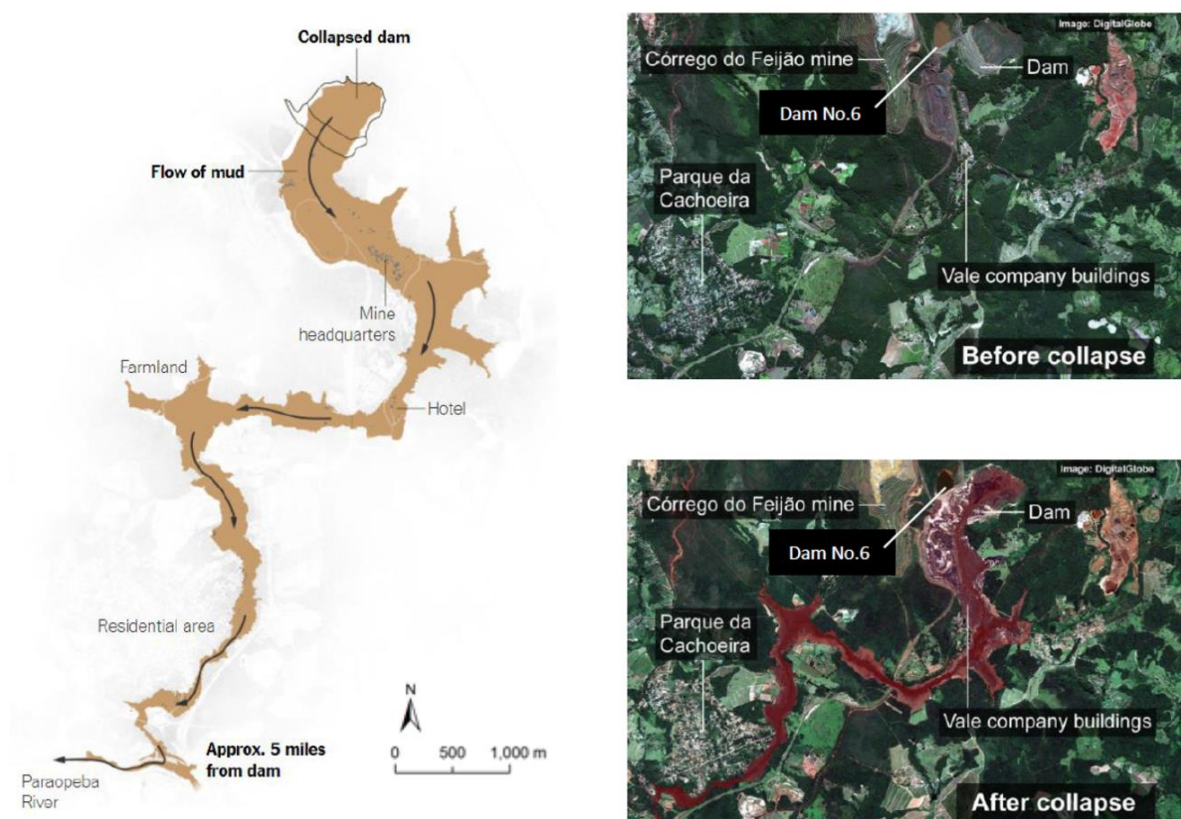


Figura 9 – Vista de satélite da região de Brumadinho antes e depois do acidente (Fonte: The New York Times, 2019).

O estudo sobre casos históricos de ruptura em estruturas de mineração demonstra que a liquefação estática pode levar estruturas de barramento (objeto de estudo do presente trabalho), ao colapso. Conforme observado, o fenômeno da liquefação é capaz de causar acidentes de magnitudes alarmantes, assim como consequências de grande impacto econômico e social. Portanto, faz-se evidente a importância de se pesquisar a respeito do fenômeno de liquefação devido ao seu impacto nos estudos de estabilidade de barragens, principalmente ao se considerar os riscos e danos associados ao rompimento destas estruturas.

2.3 Rejeito de minério de ferro

Carmignano *et. al.* (2021) afirmam que 5% da crosta terrestre é composta por ferro, sendo este o quarto elemento mais abundante na Terra. A fabricação do aço utiliza como matéria prima madeira, carvão mineral e minério de ferro. Segundo o IAB (2013), o aço é uma *commodity* fundamental na produção e distribuição de energia e itens agrícolas no Brasil, além

de ser um item de exportação de significativo impacto no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro.

O Brasil, assim como Austrália, Canadá, China, Índia e África do Sul, é um dos principais depósitos de minério de ferro do mundo (CARMIGNANO *et. al.*, 2021). A Figura 10 abaixo apresenta a localização dos depósitos econômicos de óxido de ferro.



Figura 10 – Localização dos depósitos de oxido de ferro (Fonte: Carmignano *et. al.*, 2021).

Segundo Carmignano *et al.* (2021), o Brasil possui 30 bilhões das 170 bilhões de toneladas de minério de ferro bruto disponíveis nas reservas mundiais, um depósito equivalente a aproximadamente 17,65% do minério disponível no mundo. Os estados mais importantes para a mineração de ferro no Brasil são Pará e Minas Gerais, que contribuíram com 46,7 e 41,5% da produção bruta de substâncias metálicas em 2021, respectivamente, conforme a ANM (2023). Ainda segundo a ANM, as principais empresas produtoras de ferro em 2021 foram a Vale, Anglo American, CSN, Samarco e Usiminas, das quais apenas a Samarco não produz em Minas Gerais. A ANM (2023) disponibiliza algumas informações sobre a produção e o beneficiamento de minério de ferro no Brasil e em Minas Gerais em 2021, que são apresentadas na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Dados sobre a produção bruta e beneficiada de minério de ferro no Brasil e em Minas Gerais em 2021 (Fonte: ANM, 2023).

	Produção bruta de minério de ferro		Produção beneficiada de minério de ferro	
	Milhões de toneladas	Percentual (%)	Milhões de toneladas	Percentual (%)
Brasil	567.7	100%	430.6	100%
Minas Gerais	363.3	64%	225.2	52%

No primeiro semestre de 2023, segundo IBRAM, 2023, o faturamento do setor mineral brasileiro foi de R\$120 bilhões, e 58,5% da produção com participação no faturamento do setor

foi do ferro. As exportações de minério de ferro neste período atingiram 169,6 milhões de toneladas (IBRAM, 2023). Minas Gerais seria responsável por 42,2% de participação na arrecadação total da CFEM (IBRAM, 2023). Portanto, a mineração e beneficiamento do minério de ferro são atividades cruciais na economia de Minas Gerais e que contribuem para o desenvolvimento econômico do Brasil como um todo.

O Quadrilátero Ferrífero, localizado em Minas Gerais, é considerado o mais importante produtor de minério de ferro do Brasil, sendo responsável por cerca de 51,6% das exportações do minério no país (FEMA, 2018). Conforme descrevem Roeser *et. al.*, 2010, o Quadrilátero Ferrífero compreende uma área de quase 7000km² entre Belo Horizonte (MG) e Ouro Preto (MG), sendo uma estrutura geológica cujo embasamento e regiões próximas são compostos de gnaisses tonalítico-graníticos de idade arqueana (> 2.7 bilhões de anos) e cuja área se assemelha a um quadrado. A região é rica em recursos minerais tais como ferro, ouro, topázio, esmeralda, entre outros (ROESER *et. al.*, 2010). Na Figura 11 abaixo é apresentada a região compreendida pelo Quadrilátero Ferrífero e as três unidades geológicas (Supergrupo Minas - Metassedimentos, Supergrupo Rio das Velhas – Metassedimentos Metavulcânicos e Granitos) que o compõem (ENDO, 2019).

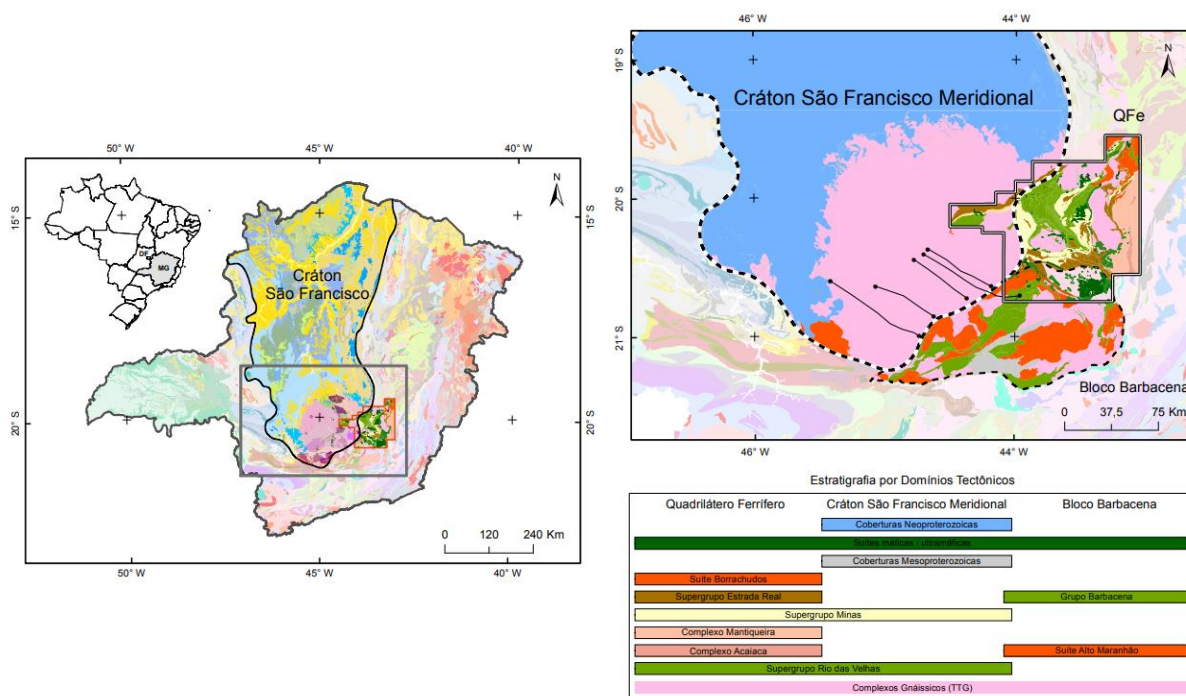


Figura 11 – Localização do Quadrilátero Ferrífero e suas unidades geológicas (Modificado de: Endo, 2019).

No Quadrilátero Ferrífero, o principal tipo de minério de ferro encontrado é rico em itabirito, uma formação ferrífera bandada (BIF) que possui um teor de ferro de cerca de 50%. O itabirito é composto principalmente por hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) e pode apresentar magnetita (Fe_3O_4) e goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$) em sua composição (CARMIGNANO *et. al.*, 2021). Entre os diferentes processos de beneficiamento de ferro, os mais comuns são separação magnética, flotação, flotação reversa, separação eletrostática, métodos de gravidade e floculação (CARMIGNANO *et. al.*, 2021). Na Figura 12 abaixo é apresentado, para fins de exemplificação, um fluxograma com os estágios típicos do beneficiamento pela metodologia de flotação, segundo NRM-18.

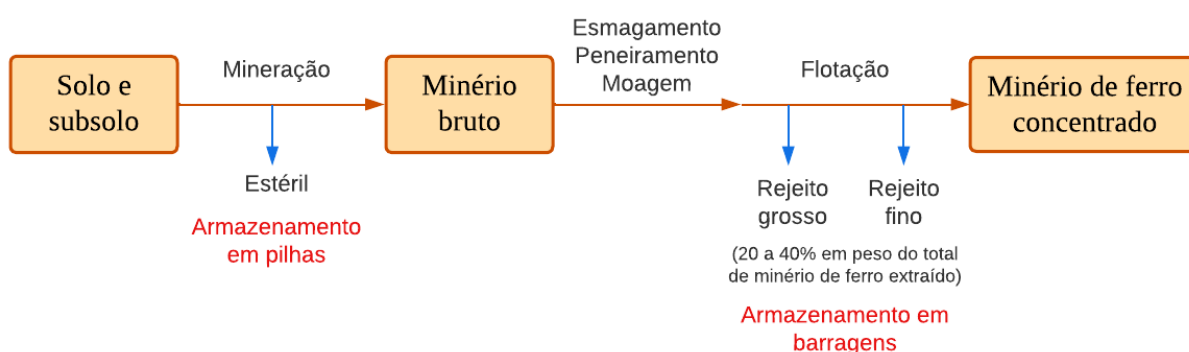


Figura 12 – Fluxograma – Representação esquemática simplificada dos processos de beneficiamento do minério de ferro pelo método de flotação e os resíduos gerados em cada etapa. (Fonte: Elaborada pela autora).

Conforme indicado, o beneficiamento do minério de ferro gera dois tipos de rejeito. O primeiro deles, nomeado rejeito grosso, é proveniente do processo de flotação. O rejeito fino por sua vez é originado no processo de deslamagem que ocorre imediatamente antes da flotação (CARMIGNANO *et. al.*, 2021). Vieira *et. al.* (2023) apresenta algumas características típicas do rejeito de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero segundo dados provenientes de um banco de dados compilado da literatura de dados de caracterização dos rejeitos publicados por 17 autores, as quais seguem na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 – Caracterização física do RMF (Fonte: Modificado de Vieira *et. al.* (2023)).

		Intervalo de valores típicos RMF do QF ⁽¹⁾	Média dos valores de RMF grosso do QF ⁽¹⁾	Média dos valores de RMF fino do QF ⁽¹⁾
Granulometria	Classificação	Silte e areias finas	Areia siltosa	Silte arenoso
	Distribuição dos grãos	-	49.9% areia fina 23.3% de silte	53.9% silte 33.0% areia fina
Densidade relativa dos grãos(Gs)		3.66	3.63	3.59
Limites de Atterberg		NP	NP	NP
Peso específico seco máximo ($\gamma_{d,máx}$)		17.7 – 21.7 kN/m ³	20kN/m ³	20.2kN/m ³

	Intervalo de valores típicos RMF do QF ⁽¹⁾	Média dos valores de RMF grosso do QF ⁽¹⁾	Média dos valores de RMF fino do QF ⁽¹⁾
Teor de umidade ótimo (w_{ot})	10 - 17%	12.60%	13.40%

(1) RMF: Rejeito de minério de ferro e QF: Quadrilátero Ferrífero.

Na Figura 13 abaixo há um compilado de curvas granulométricas de rejeitos de minério de ferro provenientes do quadrilátero ferrífero apresentado Vieira *et. al.* (2023). É possível observar que para melhor representatividade em estudos que consideram as características físicas do RMF é possível segmentar o material em grupos que apresentem propriedades físicas semelhantes, por exemplo Robertson *et. al.*, 2022 dividem o RMF em grosso e fino para desenvolver uma análise do comportamento do material.

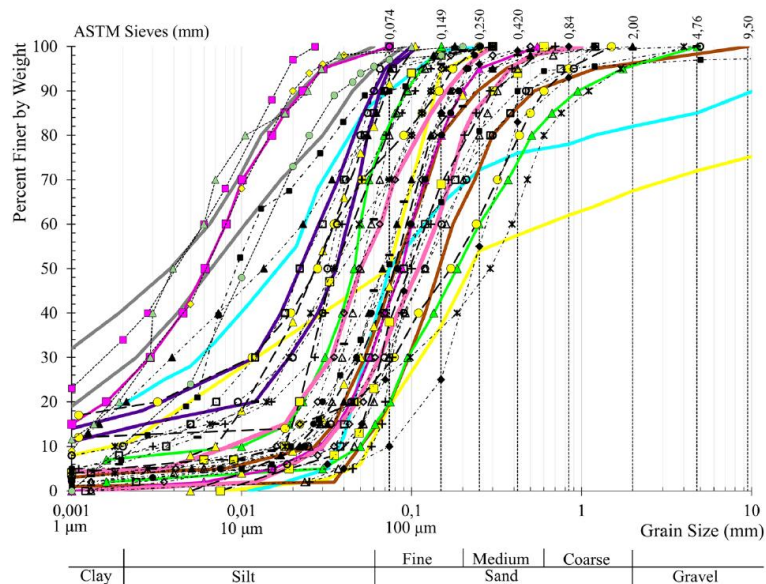


Figura 13 – Curvas granulométricas de rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero disponíveis na literatura (Fonte: Vieira *et. al.*, 2023).

Ressalta-se que a mineralogia, a microscopia, as propriedades físicas e químicas do rejeito do minério de ferro dependem de vários fatores como por exemplo a composição do minério bruto e o método de beneficiamento adotado, conforme descreve Vick (1990). Minério de ferro com alto teor de argila, por exemplo, tende a gerar rejeito composto por partículas finas (CARMIGNANO *et. al.*, 2021). Os valores acima são referenciais tipicamente apresentados na literatura que servem para balizar o banco de dados adotado neste estudo.

2.4 Ensaio triaxial

Em estudos de solos faz-se necessário desenvolver investigações por meio de ensaios de laboratório em amostras representativas das condições *in situ* para se obter dados e parâmetros de análise. Se tratando de estudos de suscetibilidade à liquefação do solo, é imprescindível a obtenção de informações sobre a resistência ao cisalhamento e o comportamento de deformação antes da falha do material. Isso pois, conforme apresentado na seção 2.1.2 anterior, o mecanismo de liquefação se dá pela súbita perda de resistência do material em certas condições de cisalhamento.

Conforme detalha Palmeira (2020), as condições encontradas em campo são reproduzidas nos ensaios triaxiais por meio da aplicação de solicitações de carregamento nas amostras de solo. Por essa razão, o ensaio triaxial é amplamente utilizado em estudos de suscetibilidade à liquefação, uma vez que possibilita o controle das condições de carregamento, deformação e drenagem do solo ensaiado e fornece dados para obtenção dos parâmetros de interesse, como o ângulo de atrito efetivo e a coesão do material.

Para que a análise do solo seja assertiva e bem embasada é preciso que ela seja fundamentada nos parâmetros de caracterização obtidos através dos ensaios que Ortigao (2007) define como simples ou índice. Dentre os ensaios índice mais convencionalmente empregados para avaliar o comportamento geomecânico dos solos, destacam-se: densidade relativa dos grãos, granulometria (peneiramento e sedimentação), peso específico, teor de umidade, índice de vazios máximo e mínimo e limites de Atterberg.

Em se tratando dos ensaios triaxiais, as normas ASTM D2850, D4767 e D7181 descrevem as diretrizes e procedimentos para a execução do ensaio. O apêndice D.3 da norma NBR 11682 (ABNT, 2009) descreve as equações para obtenção de parâmetros através dos dados do ensaio, tais como de resistência ao cisalhamento.

Conforme descrevem as normas acima citadas, o ensaio é executado em corpos de prova (CPs) cilíndricos com diâmetro de 38mm, 52mm, 70mm ou 100mm e altura de 2 (duas) a 2,5 (duas e meia) vezes maior que seu diâmetro. Os CPs devem ser moldados em câmara úmida e a partir de amostras deformadas/ amolgadas ou indeformadas.

Os corpos de prova moldados são revestidos por uma membrana de borracha totalmente impermeável. Nas extremidades do corpo de prova são encaixadas pedras porosas com diâmetro superior a 3/7 do corpo de prova com a finalidade de evitar o transporte de partículas sólidas

devido aos fluxos de água do ensaio. O conjunto corpo de prova, membrana de borracha e pedras porosas é posicionado com eixo concêntrico ao interior da câmara.

Um êmbolo localizado no topo da câmara triaxial aplica cargas axiais pré-determinadas no corpo de prova. Ocorre simultaneamente a aplicação de pressões de carregamento horizontais controladas por meio da injeção e retirada de água na câmara fechada. A Figura 14 apresenta a representação da câmara triaxial durante a execução do ensaio.

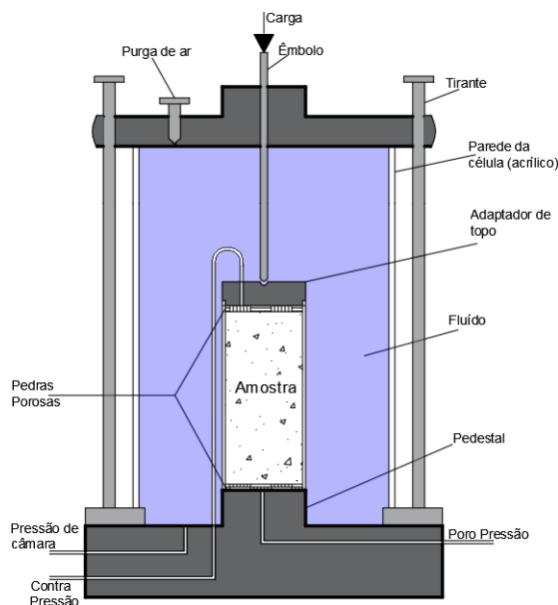


Figura 14 – Representação da câmara triaxial (Palmeira, 2020).

Ortigao (2007) descreve que o ensaio triaxial ocorre em duas fases, primeiro ocorre a fase de adensamento em que uma tensão de confinamento isotrópica (σ_c) é aplicada, em seguida ocorre a fase de cisalhamento através da aplicação de uma tensão desviadora (Equação 4) em incrementos provocando aumento da tensão axial até que aconteça a falha (ruptura do corpo de prova). A Figura 15 apresenta a representação do estado triaxial de tensões do corpo de prova durante a execução da fase de cisalhamento do ensaio.

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$$

Equação 4

Na qual:

σ_d : tensão desviadora;

σ_1 : tensão principal maior;

σ_3 : tensão principal menor ou tensão confinante.

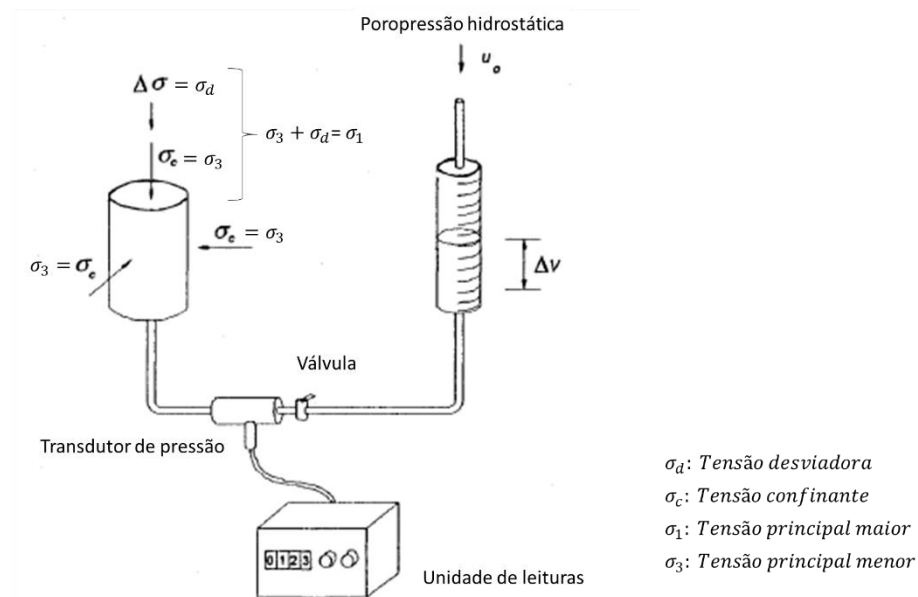


Figura 15 – Estado de tensões do corpo de prova durante a fase de cisalhamento do ensaio triaxial (Moficado de: Ortigao, 2007).

Além das tensões axial e horizontal, também são controladas as condições de poropressão durante o ensaio por meio da injeção de água no interior do CP. Um transdutor de pressão é conectado à parte inferior do ensaio para aferir as leituras de poropressão ao longo de sua execução.

O ensaio pode ser executado em condições não consolidadas e não drenadas (UU), consolidadas e não drenadas (CU) e consolidadas e drenadas (CD). Ortigão (2007), descreve as diferentes condições de execução do ensaio, as mais usuais são resumidas abaixo:

- Ensaio consolidado drenado (CD): Primeiro ocorre a fase de consolidação/adensamento na qual, a tensão confinante (σ_c) é aplicada e gera um excesso de poropressões (Δu), a drenagem durante esta fase é permitida e no fim da consolidação o Δu foi totalmente dissipado. Em seguida ocorre a fase de cisalhamento com taxa de tensão cisalhante ajustada para possibilitar a dissipação total do Δu gerado no material. Portanto, nestas condições as leituras de poropressões se mantém constantes, porém o volume da amostra varia com o decorrer do ensaio.
- Ensaio consolidado não drenado (CU): Assim como no ensaio CD, a primeira fase de consolidação é drenada e o excesso de poropressão (Δu) gerado nesta fase é dissipado. Em seguida ocorre a fase de cisalhamento não drenada, gerando Δu que

não é dissipado do material. Nestas condições as leituras de poropressões variam com o decorrer do ensaio, porém o volume da amostra se mantém constante.

O ensaio triaxial ainda pode ser com deformação lateral impedida, indicado pelas siglas CKU quando não drenado e CKD quando drenado, do tipo adensado anisotropicamente, indicado pelas siglas CAU quando não drenado e CAD quando drenado, entre outras condições possíveis de ensaio.

Para que seja possível realizar uma análise adequada dos resultados do ensaio, o laboratório responsável por sua execução deve fornecer informações sobre as características do corpo de prova tais como altura, diâmetro, peso úmido, teor de umidade, peso seco, massa específica dos sólidos, índice de vazios, grau de saturação, entre outras. As condições de execução do ensaio também devem ser informadas, entre elas a pressão hidrostática durante a fase de consolidação, a tensão confinante durante o cisalhamento, a taxa de cisalhamento, o índice de vazios inicial do corpo de prova e o valor do parâmetro B de Skempton, definido pela Equação 5 (SKEMPTON, 1954). Esse último resume a relação entre a variação de poropressão no corpo de prova na condição não drenada pela variação de tensão total imposta, o que corrobora para o entendimento sobre a saturação corpo (para material saturado $B \approx 1$).

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} = \frac{1}{1 + nC_v/C} \quad \text{Equação 5}$$

Na qual:

Δu : Acréscimo de poropressão;

$\Delta \sigma_3$: Acréscimo de tensão confinante;

n : Porosidade;

C_v : Compressibilidade do fluido nos vazios (água);

C : Compressibilidade do solo.

Já os dados brutos dos ensaios triaxiais incluem, entre outros, valores das leituras de tensão confinante ou tensão principal menor ($\sigma_c = \sigma_3$), tensão desviadora (σ_d), excesso de poropressão (Δu), variação de volume (ΔV) e deformação axial da amostra (ε_a), obtida conforme Equação 6 abaixo

$$\varepsilon_a(\%) = \Delta_v/h_{CP}$$

Equação 6

Na qual:

Δ_v : Variação de volume;

h_{CP} : Altura do corpo de prova.

A partir destes dados é possível fazer análises e cálculos de parâmetros para compreender o comportamento do solo frente ao cisalhamento. Uma das análises mais representativas obtidas a partir dos ensaios triaxiais são as trajetórias de tensões totais e de tensões efetivas, que podem ser calculadas pelas metodologias Cambridge (Equação 7) ou MIT (Equação 8). A Figura 16 abaixo apresenta um exemplo de trajetória de tensões efetivas obtida através do processamento pela metodologia Cambridge dos dados apresentados por Cella *et. al.* (2021) de onze (11) ensaios triaxiais CIU executados em quatro (04) amostras de rejeito de minério de ferro.

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_c; \quad p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad e \quad p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$$

Equação 7

$$t = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}; \quad s' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad e \quad s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

Equação 8

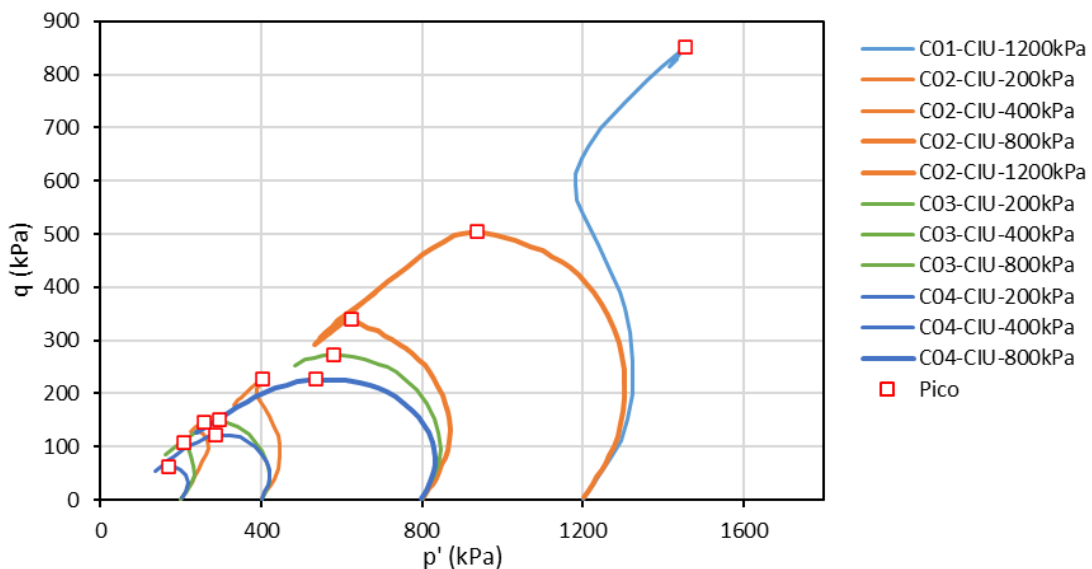


Figura 16 – Trajetória de tensões efetivas – Metodologia Cambridge (Modificado de: Cella *et. al.*, 2021).

Outro parâmetro comumente obtido de forma indireta dos dados do ensaio é o ângulo de atrito efetivo de pico do solo (Φ'), definido como o ângulo máximo em que a força exercida sobre o solo pode ser inclinada em relação à força normal à superfície de contato, sem provocar o deslizamento do solo ao longo do plano de ruptura (PINTO, 2006). Seu cálculo utiliza como parâmetro de entrada a inclinação da reta formada pelas tensões efetivas de pico e a coesão do solo. Na Figura 17 abaixo é apresentada a trajetória de tensões efetivas obtidas pela metodologia Cambridge, a representação gráfica da reta formada pela linha de tendência das tensões efetivas de pico e sua inclinação η . Também são apresentadas abaixo as metodologias de cálculo Cambridge (Equação 9) e MIT (Equação 10).

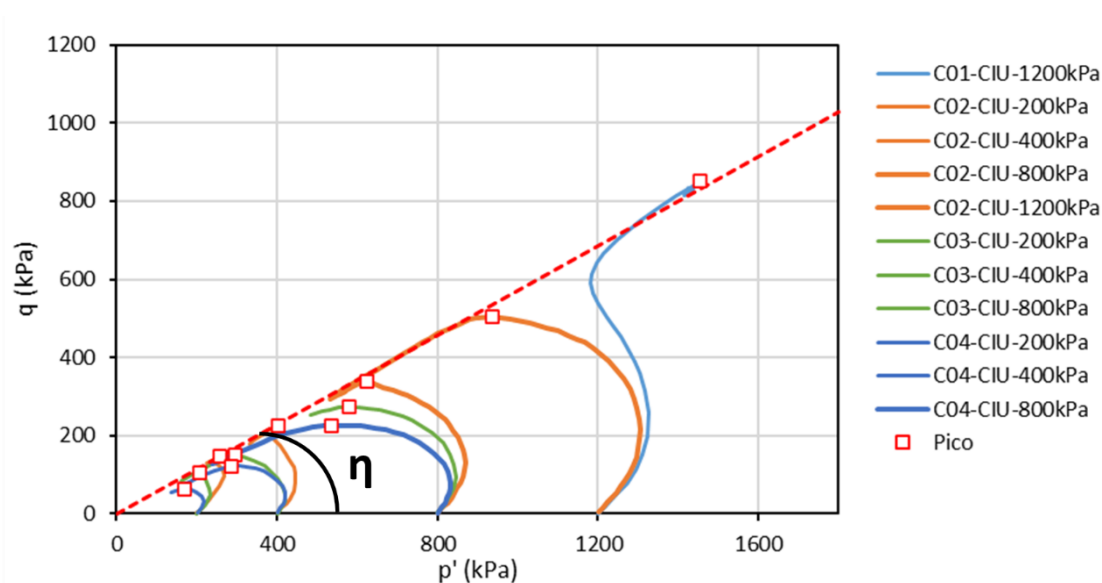


Figura 17 – Representação da reta formada pela tendência das tensões efetivas de pico e sua sua inclinação η - Trajetória de tensões efetivas – Metodologia Cambridge (Modificado de: Cella *et. al*, 2021)

$$\text{sen}(\Phi') = \frac{3 \times \tan(\eta)}{6 + \tan(\eta)} \quad \text{Equação 9}$$

Na qual:

η : Inclinação da reta formada pelos pontos de tensão efetiva de pico (q e p') e coesão (c') do ensaio.

$$\text{sen}(\Phi') = \tan(\alpha') \quad \text{Equação 10}$$

Na qual:

α' : Inclinação da reta formada pelos pontos de tensão efetiva de pico (t e s') e coesão (c') do ensaio.

Conforme apresentado anteriormente, dos resultados dos ensaios triaxiais é possível obter ainda a coesão (c') do solo. Coesão é definida como a capacidade de um solo resistir ao cisalhamento na ausência de pressão externa (PINTO, 2006). Essa resistência pode ter três origens: a presença de um agente cimentante natural que promove a aglutinação dos grãos; as ligações resultantes do potencial atrativo de natureza molecular; e o efeito da pressão capilar na água intergranular (PINTO, 2006). A coesão é obtida graficamente pelo ponto de interseção entre a reta formada pelos pontos de tensão efetiva de pico (q e p' ou t e s') e o eixo vertical (q ou t).

Outros parâmetros de resistência (i.e.: Su_{Pico}) e parâmetros de análise (i.e.: A de Skempton, E_{50} , G_{50}) podem ser obtidos dos ensaios triaxiais. Além disso, diversas análises gráficas (i.e.: Parâmetro A de Skempton vs. Deformação Axial, Variação de Poropressão vs. Deformação Axial, Resistência Não Drenada Su_{Pico} / σ'_v vs σ'_3 , Tensão Desviadora vs. Deformação axial etc.) podem ser realizadas para possibilitar uma investigação mais detalhada do comportamento material quando cisalhado.

2.5 Mecânica dos solos do estado crítico

A Teoria dos Estados Críticos (TEC) explica o fenômeno de liquefação de solos considerando um comportamento elastoplástico do material, conforme descreve Fonseca (2013). A TEC baseia-se em hipóteses sobre o comportamento de deformação do material quando sujeito a variações de tensão. Para tanto, conforme descreve Borges *et. al.* (1998), adota-se a hipótese de que uma determinada variação no estado de tensão do material provoca um incremento de deformação total que pode ser decomposto em duas parcelas: uma parcela elástica, recuperável mediante aplicação de uma descarga de tensões simétricas à tensão aplicada, e outra parcela plástica, inalterável.

A concepção de que um solo, quando sujeito a deformações distorcionais, pode entrar em cedência é o ponto de partida para a compreensão da liquefação na TEC (JEFFERIES e BEEN, 2016.). O fenômeno de cedência foi descrito pelo DNER (1997) como sendo precedente à ruptura de um material submetido a tensões, caracterizado pela falta de linearidade entre as

tensões e correspondentes deformações, portanto pelo fim do comportamento elástico do material.

Quando no estado de cedência, Jefferies e Been (2016) afirmam que o solo continua a deformar-se até atingir a Linha de Estado Crítico - LEC (*Critical State Line – CSL*), que representa a situação em que o material está em condições de plasticidade perfeita. Os autores conceituam que o solo ao se deformar sem apresentar variação de volume nem variação das componentes do tensor das tensões efetivas encontra-se em estado crítico. O modelo Nor Sand pode ser entendido como uma extensão dos modelos Cam-clay (ROSCOE, 1963 e SCHOFIELD e WROTH, 1968) e Cam-clay modificado (ROSCOE e BURLAND, 1968), no qual as superfícies de cedência e ruptura são representadas pela pirâmide hexagonal de Mohr-Coulomb (Figura 18) no espaço das tensões principais efetivas (JEFFERIES e BEEN, 2016).

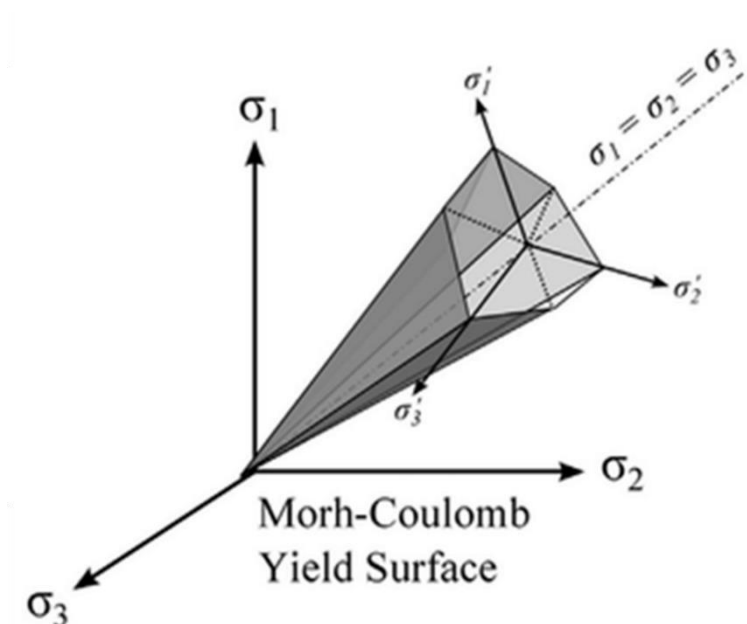


Figura 18 – Representação das superfícies (a) cone de Drucker-Prager e (b) pirâmide hexagonal de Mohr-Coulomb (Fonte: Garner *et. al.*, 2015).

Convencionalmente analisa-se a LEC através da representação linear e vs. $\ln(p')$, obtida através da Equação 11 (JEFFERIES AND BEAN, 2016). A representação foi simplificada através da curva LEC idealizada, obtida pela Equação 12. Na simplificação os parâmetros a , b , c são ajustados manualmente para melhor representar o verdadeiro comportamento do material, determinado através da interpretação dos ensaios (CELLA *et. al.*, 2021).

$$e_c = \Gamma - \lambda_e \ln(p')$$

Equação 11

Na qual:

e_c : índice de vazios crítico;

Γ : índice de vazios crítico na pressão de referência;

λ_e : inclinação da LEC na representação em escala logarítmica;

p' : tensão efetiva.

$$e_c = a + b \left(\frac{p'_c}{p'_{ref}} \right)^c \quad \text{Equação 12}$$

A definição e o estudo da LEC baseiam-se nos resultados de tensão-deformação obtidos dos ensaios triaxiais (ORTIGÃO, 2007). A partir dos valores de índice de vazios crítico e tensão correspondente obtidos dos resultados destes ensaios é possível plotar no espaço p' : e os pares de pontos (p' ; e_c). A tendência de alinhamento destes pares de pontos define a LEC do material ensaiado. Desta forma com base nestes pontos são calibrados os parâmetros Γ e λ_e da equação linear (Equação 11) e os parâmetros a , b e c da equação simplificada (Equação 12), a fim de melhor representar o alinhamento dos pontos de referência (ORTIGÃO, 2007).

Para analisar a proximidade de um determinado estado de tensão em relação ao estado crítico utiliza-se o parâmetro nível de tensão (*stress level – SL*), definido como a relação descrita na Equação 13 (JEFFERIES e BEEN, 2016). O SL varia de 0 a 1, sendo a unidade correspondente a relação de tensões do estado crítico (JEFFERIES e BEEN, 2016).

$$SL = \frac{q}{pM} = \frac{tg\gamma}{tg\psi} \quad \text{Equação 13}$$

Na qual:

γ : ângulo da linha de estado de tensão com a horizontal;

ψ : parâmetro de estado ou ângulo da LEC com a horizontal.

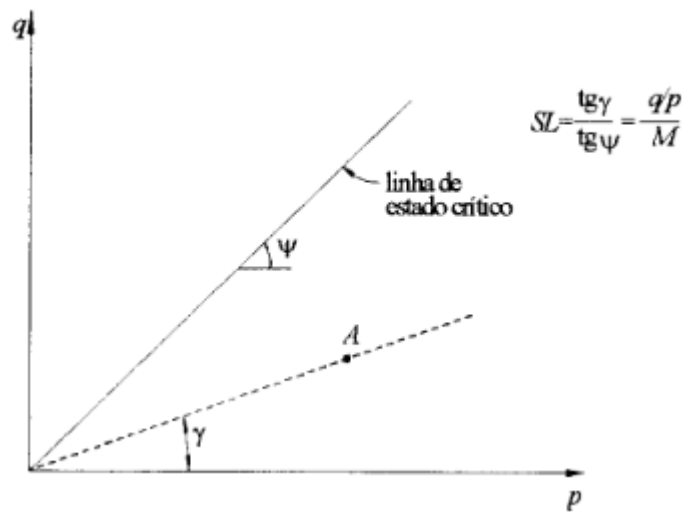


Figura 19 – Representação gráfica da LEC e do estado de tensão A analisado (Fonte: Borges *et. al.*, 1998).

Ainda para compreender o comportamento do material no estado crítico foi indexado o parâmetro de estado (ψ) que expressa a diferença entre o índice de vazios natural e o índice de vazios correspondente à LEC do material, conforme Equação 14 abaixo (NÓBREGA, 2021).

$$\psi = e_0 - e_{cv} \quad \text{Equação 14}$$

Na qual:

e_0 : índice de vazios natural ou de repouso;

e_{cv} : índice de vazios correspondente à Linha de Estados Críticos.

Conforme descrito no capítulo 2.1.1, os materiais podem ser classificados segundo a sua resistência ao cisalhamento e a deformação como dilatantes ou contráteis. O parâmetro de estado possibilita uma compreensão da condição solta (dilatante) ou densa (contrátil) do material para um determinado valor de tensão média efetiva (p') (NÓBREGA, 2021). Isso porque um material que apresente um índice de vazios natural maior que o índice de vazios correspondente à LEC para o mesmo nível de tensão efetiva ($e_0 > e_{cv}$) terá um parâmetro de estado crítico com valor positivo ($\psi > 0$), indicando que o material se encontra em condição densa. Esta situação é representada na Figura 20 abaixo. Analogamente, um material que apresentar $e_0 < e_{cv}$ terá $\psi < 0$, indicando que o material se encontra em condição solta.

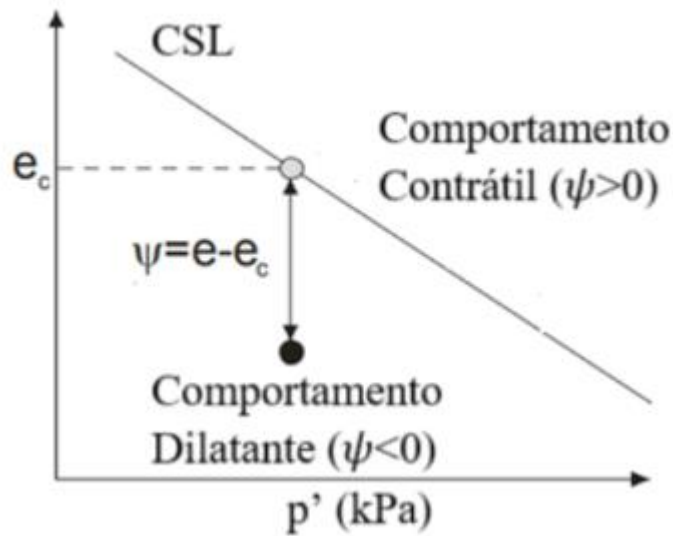


Figura 20 – Representação gráfica da LEC e do parâmetro de estado (Fonte: Gomes *et. al.*, 2022).

Jefferies e Been, 2016 propõem uma análise do material em estado crítico através da relação entre a taxa de tensão (η), definida conforme Equação 15, e a dilatância equivalente (D) do material, conforme Equação 16.

$$\eta = \frac{q}{p'} \quad \text{Equação 15}$$

$$\eta_{m\acute{a}x} = M_{tc} - (1 - N_{tc})D_{m\acute{i}n} \quad \text{Equação 16}$$

Na qual:

$\eta_{m\acute{a}x}$: razão de tensão máxima;

M_{tc} : inclinação da linha de estado crítico no plano $p' - q$ obtido por meio de ensaios triaxiais;

N_{tc} : coeficiente de acoplamento volumétrico obtido por meio de ensaios triaxiais.

Além disso, o módulo de cisalhamento ou módulo de rigidez G do solo, definido como a razão entre a razão de cisalhamento aplicada e a deformação específica relacionada, também é utilizado na análise do comportamento do solo quando submetido à tensões cisalhantes (JEFFERIES e BEEN, 2016). Na Figura 21 abaixo é apresentado um exemplo do cálculo desses

parâmetros. A Figura 21(a) mostra a CSL obtida através da Equação 12, a Figura 21(b) mostra o gráfico η_{max} versus D_{min} utilizado para estimar os parâmetros M_{tc} e N , a Figura 21(c) mostra a relação estado-dilatação utilizada para estimar o parâmetro χ , e a Figura 21(d) mostra o gráfico de G versus p .

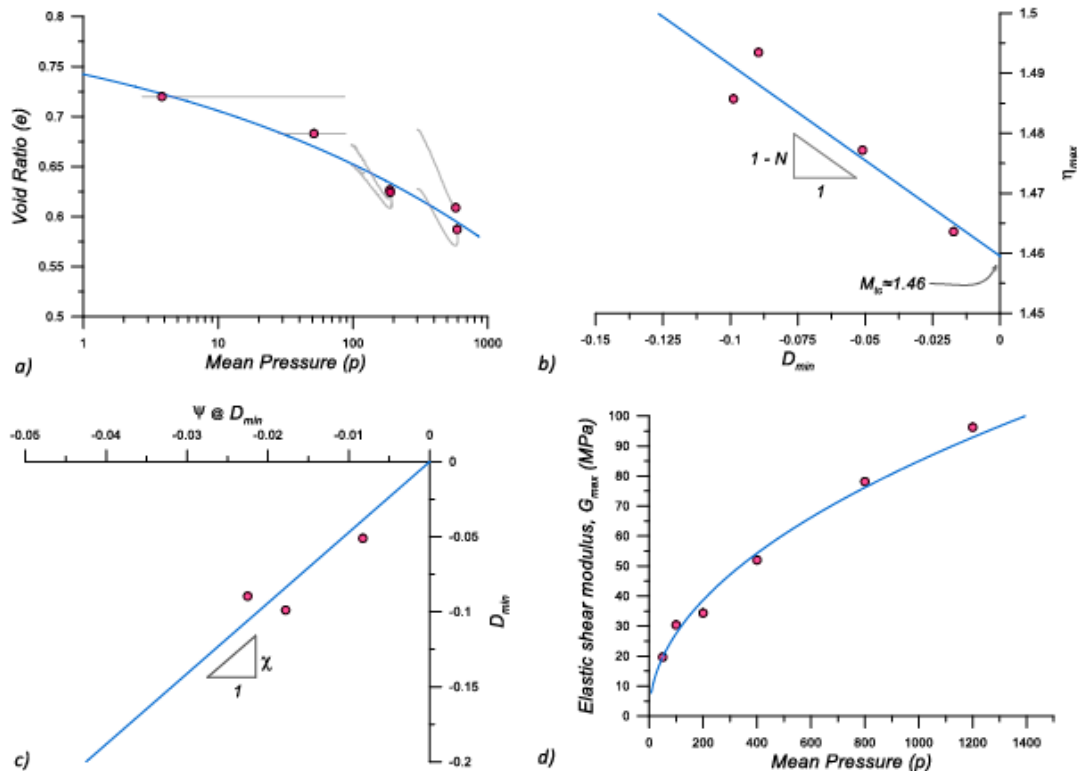


Figura 21 – Representação gráfica da Linha de Estado Crítico obtida para cinco (05) rejeitos diferentes e os pontos utilizados na calibração da equação obtidos através de ensaio de laboratório (Fonte: Macedo e Vergaray *et. al.*, 2022).

2.6 Análises estatísticas em tratamento de dados geotécnicos

Em contextos nos quais os conjuntos de dados apresentam ampla variabilidade, torna-se essencial empregar uma abordagem de análise baseada em probabilidade e estatística (MENDES, 2019). Isso porque a estatística é uma ciência que fornece ferramentas que possibilitam a tomada de decisões e conclusões na presença de variabilidades (MONTGOMERY, 2021).

Silvestre (2007) descreve o processo de análise estatística partindo da determinação do problema a ser estudado. Em seguida é feita a definição das medidas ou parâmetros que serão avaliados para analisar a questão definida. Posteriormente é feita a recolha de dados para a análise de interesse. Na sequência esses dados são organizados, descritos e sintetizados. Por fim são feitas as inferências estatísticas para obtenção de medidas sumárias que serão utilizadas para avaliar a situação problema (SILVESTRE, 2007).

Em se tratando de estudos geotécnicos os objetos de interesse para análise são os solos, que apresentam parâmetros de grande variabilidade. Os dados a serem analisados podem ser provenientes da observação tátil-visual do material, de ensaios de campo executados *in-situ* ou de ensaios de laboratório executados em amostras representativas coletadas no local de estudo.

Para analisar os parâmetros de estudo do solo em estado crítico e compreender a suscetibilidade à liquefação do material alguns conceitos básicos da estatística podem ser aplicados. Montgomery (2021) define:

- População: conjunto finito ou infinito de todos os resultados obtidos para a variável de interesse;
- Amostra/ amostragem: subconjunto limitado e representativo da população;
- Medidas de tendência central
 - Média aritmética: razão entre o somatório e o número n de dados no conjunto (Equação 17)

$$\bar{X} = \mu = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_1^n x}{n} \quad \text{Equação 17}$$

- Mediana: valor central do conjunto de amostras ($x_{n/2}$) encontrado ao ordenar os dados em valores crescentes ou decrescentes;
- Moda: valor de maior frequência, que mais se repete no conjunto amostral;
- Variância: medida de dispersão que expressa a distância de cada valor do conjunto em relação ao valor central (Equação 18)

$$\sigma^2 = \frac{\sum_1^{n-1} (x_i - \bar{X})}{(n - 1)} \quad \text{Equação 18}$$

- Desvio padrão: raiz quadrada da variância, também é uma medida de dispersão do conjunto (Equação 19)

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

Equação 19

- Coeficiente de variação: expressa a variabilidade do conjunto amostral (Equação 20)

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{X}}$$

Equação 20

- Percentil: descreve a posição relativa de um valor em um conjunto de dados, indicando a porcentagem de dados que está abaixo desse valor. Por exemplo, o 70º percentil representa o valor abaixo do qual 70% dos dados estão localizados.
- Quartil: medida estatística que divide um conjunto de dados em quatro partes iguais, cada uma representando 25% dos valores. O primeiro quartil (Q1) é o valor abaixo do qual 25% dos dados estão localizados, o segundo quartil (Q2) é a mediana, representando o ponto médio dos dados, e o terceiro quartil (Q3) é o valor abaixo do qual 75% dos dados estão situados.
- *Box plot*: método gráfico de análise estatística de dados quantitativos que apresenta em uma mesma figura as informações de mínimo, máximo, primeiro quartil (Q1), terceiro quartil (Q3), média e mediana (Figura 22). Através desta representação é possível identificar no conjunto amostras cujos valores são discrepantes dos limites superior e inferior que representam o banco de dados analisado, estes valores discrepantes são chamados *outliers*.

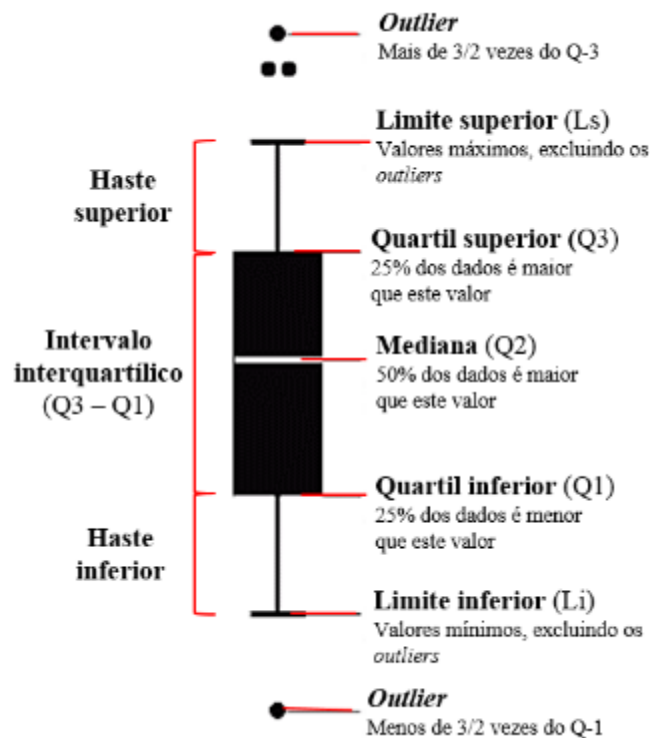


Figura 22 – Representação esquemática do *Box Plot* (Fonte: Neto et. al., 2017).

- Linha de tendência ou regressão: a partir de um conjunto de dados plotados em um gráfico é possível obter uma linha de tendência cuja confiabilidade é expressa pela proximidade do parâmetro R^2 (coeficiente de determinação) do valor 1,00. A linha de tendência adotada pode ser linear, logarítmica, polinomial, exponencial ou uma média móvel, de modo a melhor se ajustar ao conjunto de dados analisado.

Neste trabalho, os conceitos estatísticos serão aplicados para análise de um banco de dados de parâmetros de estado crítico de diferentes rejeitos de minério de ferro disponíveis na literatura visando averiguar sua representatividade. A partir das análises estatísticas serão obtidas tendências para os parâmetros a fim de se traçar o comportamento típico da Linha de Estado Crítico para amostras de rejeito com características físicas similares entre si.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho se preza a propor a avaliação da existência de correlações entre os parâmetros de calibração das curvas das Linhas de Estado Crítico (LEC) e as características físicas expressas pelos parâmetros de índice do Rejeito de Minério de Ferro (RMF). Para tal, foram compilados dados de ensaios de caracterização, ensaios triaxiais e dos parâmetros da LEC de uma amostragem representativa do material. Quando apresentados de forma gráfica nas fontes de dados, através de figuras representando os resultados dos ensaios de granulometria, ensaio triaxiais e a LEC calibrada para a amostra, os dados gráficos foram digitalizados através da plataforma online *WebPlotDigitizer*, compondo um banco de dados digital quantitativo compilado no software Excel.

A partir do banco de dados compilado, foi elaborada a representação gráfica conjunta das curvas granulométricas das amostras estudadas, a fim de identificar conjuntos de materiais com características físicas semelhantes. As amostras foram categorizadas em dois grupos segundo critério considerando a distribuição granulométrica de suas partículas.

Para identificar possíveis *outliers* no banco de dados, buscar que as amostras estudadas sejam representativas dos RMF e evitar que sejam considerados no estudo materiais com características muito específicas quando comparados aos demais da amostragem, foi feita a avaliação dos valores de cada um dos parâmetros físicos e da LEC estudados em *box plot*. Desta análise foram identificadas as amostras com valores discrepantes e consideradas não representativas dos grupos de rejeito estudados. Estas amostras *outliers* provavelmente apresentam características muito particulares que podem estar relacionadas à mineralogia, à microscopia, ao beneficiamento do minério bruto, etc. Por essa razão, mesmo se tratando de amostras de rejeito de minério de ferro, os materiais *outliers* foram descartadas das análises.

Com o intuito de avaliar previamente a existência de correlação entre os parâmetros índice das amostras, analisou-se gráfica e estatisticamente os dados de parâmetros físicos (percentual de finos, Gs, D50 e Cu) das amostras compiladas. Em seguida, a fim de verificar a representatividade das diversas condições de carregamento as quais o RMF pode estar submetido, avaliou-se a diversidade de tensões confinantes observadas no banco de dados de ensaios triaxiais compilados.

A assertividade da definição dos parâmetros da LEC está diretamente relacionada com a quantidade de pontos obtidos de resultados de ensaios triaxiais utilizados. Neste sentido, analisou-se a quantidade de ensaios triaxiais considerados na calibração das LEC compiladas no banco de dados estudado, a fim de verificar a representatividade das calibrações consideradas.

Por fim, avaliou-se a existência de correlação entre os parâmetros da LEC e os parâmetros de índice das amostras. A avaliação foi feita de forma gráfica, por meio da representação de pontos obtidos pelos dois parâmetros (de índice e de calibração da LEC) de cada amostra analisada. Desta, obteve-se linhas de tendência de comportamento para cada grupo de material anteriormente categorizado segundo critério granulométrico. A confiabilidade da curva de tendência obtida foi avaliada por meio do respectivo parâmetro de dispersão R^2 . Além disso, a avaliação foi feita de forma estatística considerando os dados de cada parâmetro analisado compilados para cada grupo de material, cujos resultados foram comparados entre os grupos (rejeito fino e rejeito grosso).

Na Figura 23 abaixo é apresentado um fluxograma que resume a metodologia empregada neste estudo.

ANÁLISE DE DADOS DE ENSAIOS TRIAXIAIS EM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PARA OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DE ESTADO CRÍTICO

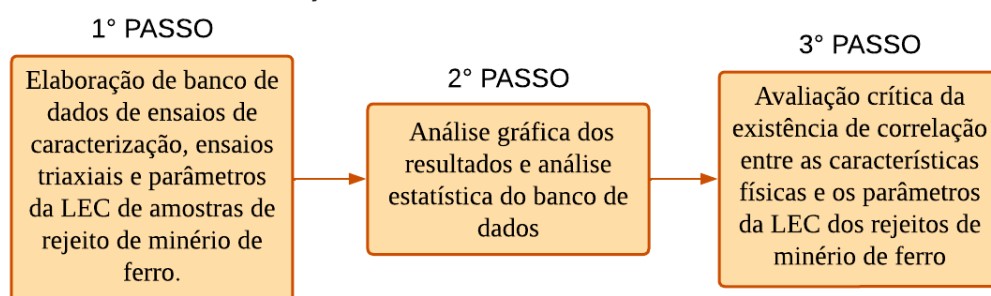


Figura 23 – Fluxograma – Metodologia empregada no presente estudo. (Fonte: Elaborada pela autora).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Banco de dados

Para avaliar possíveis correlações entre os parâmetros físicos e os parâmetros da Linha de Estado Crítico (LEC) de Rejeitos de Minério de Ferro (RMF), foram compilados resultados de ensaios de caracterização, de ensaios triaxiais e parâmetros da LEC de 21 amostras deste material. As amostras de RMF compiladas tem diversas origens, incluindo regiões do quadrilátero ferrífero no Brasil além de amostras coletadas na China e na Austrália. Estes dados foram obtidos de trabalhos disponíveis na literatura e do acervo da autora.

As amostras consideradas neste estudo, seus respectivos parâmetros físicos, local de coleta da amostra e a fonte dos dados são apresentados na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 – Amostras de RMF considerados no presente estudo, parâmetros físicos e fonte dos dados. (Fonte: Elaborado pela autora).

ID ¹	Gs ²	LP (%) ³	IP (%) ⁴	Argila (%) ⁶	Silte (%) ⁶	Finos (%) ⁶	Areia (%) ⁶	Pedregulho (%) ⁶	Local	Fonte
1	3.5	NP	NP	0.0	4.8	4.8	94.8	0.4	Brasil	Acervo da autora
2	3.6	NP	NP	2.1	30.0	32.1	67.9	0.0	Brasil	Acervo da autora
3	3.7	NP	NP	4.1	78.0	82.1	17.9	0.0	Brasil	Acervo da autora
4	2.9	NP	NP	2.7	53.0	55.7	44.3	0.0	Brasil	Acervo da autora
5	4.0	NP	NP	5.5	10.7	16.2	70.1	13.7	Brasil	Consoli, 2023
6	2.8	NP	NP	2.8	5.6	8.4	30.6	61.0	Brasil	Consoli, 2023
7	5.0	NP	NP	3.6	34.4	38.0	60.0	2.0	Brasil	Cella et. al., 2021
8	3.4	14.0	2.0	7.5	65.8	73.3	26.7	0.0	Brasil	Acervo da autora
9	3.3	14.0	3.0	10.5	66.6	77.1	22.9	0.0	Brasil	Acervo da autora
10	3.5	16.0	1.0	9.2	72.9	82.0	18.0	0.0	Brasil	Acervo da autora
11	3.1	NP	NP	0.0	11.8	11.8	88.2	0.0	Brasil	Carrizo et. al., 2023
12	3.1	- ⁵	- ⁵	0.5	18.5	19.0	81.0	0.0	China	Li and Coop, 2019
13	3.1	- ⁵	- ⁵	2.9	66.7	69.5	30.5	0.0	China	Li and Coop, 2019
14	3.4	- ⁵	- ⁵	4.7	88.3	93.0	7.0	0.0	China	Li and Coop, 2019
15	3.0	NP	NP	14.0	68.0	82.0	18.0	0.0	Austrália	Reid and Fanni, 2020
16	3.6	NP	NP	4.6	75.3	79.9	20.1	0.0	Brasil	Silva et. al., 2022
17	4.5	- ⁵	- ⁵	5.0	47.0	52.0	47.0	1.0	Brasil	Robertson et. al., 2019
18	3.9	17	4	7.6	64.2	71.8	28.2	0.0	Brasil	Robertson et. al., 2019
19	4.9	NP	NP	3.8	30.2	34.0	63.0	3.0	Brasil	Robertson et. al., 2019
20	4.6	NP	NP	7.0	80.0	87.0	12.5	0.5	Brasil	Acervo da autora
21	4.5	NP	NP	9.3	65.5	74.8	20.8	4.4	Brasil	Acervo da autora

NOTAS:

1: ID é a identificação da amostra no banco de dados;

2: Gs é o parâmetro físico adimensional densidade relativa dos grãos;

3: LP é o Limite de Plasticidade do material;

4: IP é o Índice de Plasticidade do material.;

5: Ensaios para os quais não foram identificados resultados ou que não foram executados;

6: Os percentuais de argila, silte, areia e pedregulho foram definidos considerando a classificação SUCS.

O percentual de argila, silte, finos, areia e pedregulho presente em cada amostra foi definido a partir das respectivas curvas granulométricas (Figura 24). Para isso, foram considerados os tamanhos máximos das partículas de 0,002mm para argilas, 0,075mm para siltes e 2mm para areias, definidos pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), da sigla em inglês USCS, proposto por Casagrande em 1932. As amostras estudadas foram classificadas como representativas de rejeitos finos ou grossos, com a finalidade de se avaliar de forma comparativa o comportamento dos parâmetros da LEC para estes dois grupos de materiais. Foram considerados rejeitos finos aqueles que apresentaram percentual de finos

(argila + silte) maior que 50%, e rejeitos grossos aqueles que apresentaram percentual de finos menor que 50%. Esta divisão dos materiais vai de encontro com a classificação SUCS, que é comumente utilizada na prática dos projetos de geotecnia. O percentual de finos e a classificação de cada amostra é apresentada na Tabela 4.

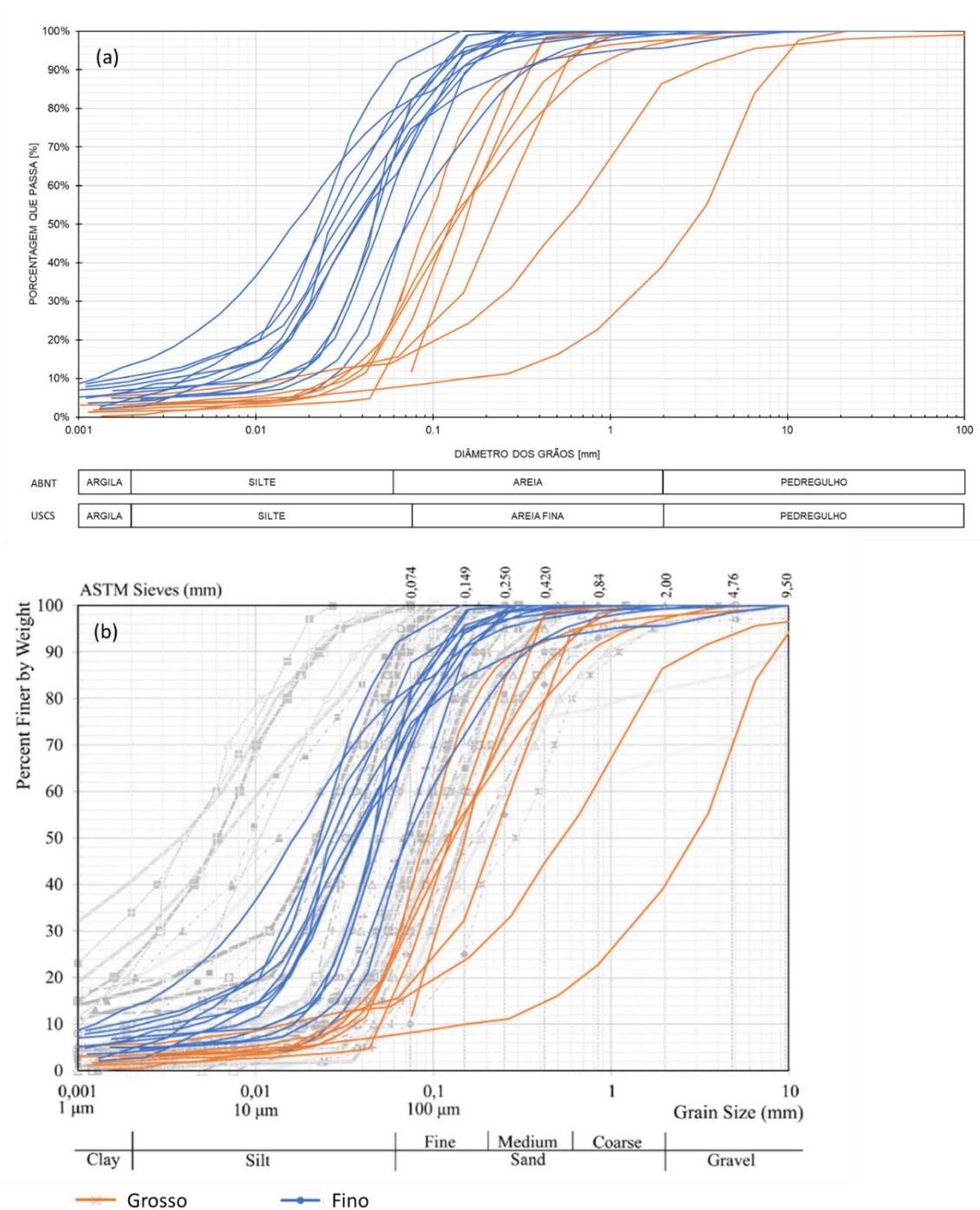


Figura 24 – Curvas granulométricas (a) das 21 amostras estudadas e (b) comparadas com as curvas granulométricas de amostras de RMF apresentadas por Vieira *et. al.*, 2023. (Fonte: (a) Elaborada pela autora e (b) modificado de Vieira *et. al.*, 2023).

Tabela 4 – Classificação das amostras de RMF. (Fonte: Elaborada pela autora).

Identificação	Finos (%)	Classificação
1	4.78	Grosso
2	34.19	Grosso
3	86.15	Fino
4	58.42	Fino
5	21.69	Grosso
6	11.16	Grosso
7	41.55	Grosso
8	80.79	Fino
9	87.51	Fino
10	91.15	Fino
11	11.77	Grosso
12	19.50	Grosso
13	72.35	Fino
14	97.70	Fino
15	96.00	Fino
16	84.49	Fino
17	57.00	Fino
18	79.40	Fino
19	37.80	Grosso
20	94.00	Fino
21	84.11	Fino

Da análise comparativa entre as curvas granulométricas das amostras de RMF do banco de dados do presente estudo e as curvas de amostras do material compiladas e apresentadas por Viera et. al., 2023 (Figura 24 (b)) percebe-se que, de modo geral, as amostras do banco de dados estudado encontram-se na faixa mais grossa do intervalo de curvas apresentado no estudo de referência. As amostras 5 e 6 apresentadas por Consoli (2023) apresentaram granulometrias mais grossas do que as apresentadas por Viera *et. al.*, 2023 para RMF. Entende-se, por esse motivo, que essas amostras são provenientes de materiais com granulometrias muito particulares que podem enviesar os resultados.

A partir das curvas granulométricas compiladas foi possível determinar os parâmetros D10, D30, D50 e D60 de cada amostra, tendo sido calculados os respectivos coeficientes de uniformidade (Cu). Na Figura 25 abaixo são apresentados os pontos obtidos para os valores de D10, D30, D50 e D60 de cada amostra, e na Tabela 5 são apresentados os parâmetros e coeficientes.

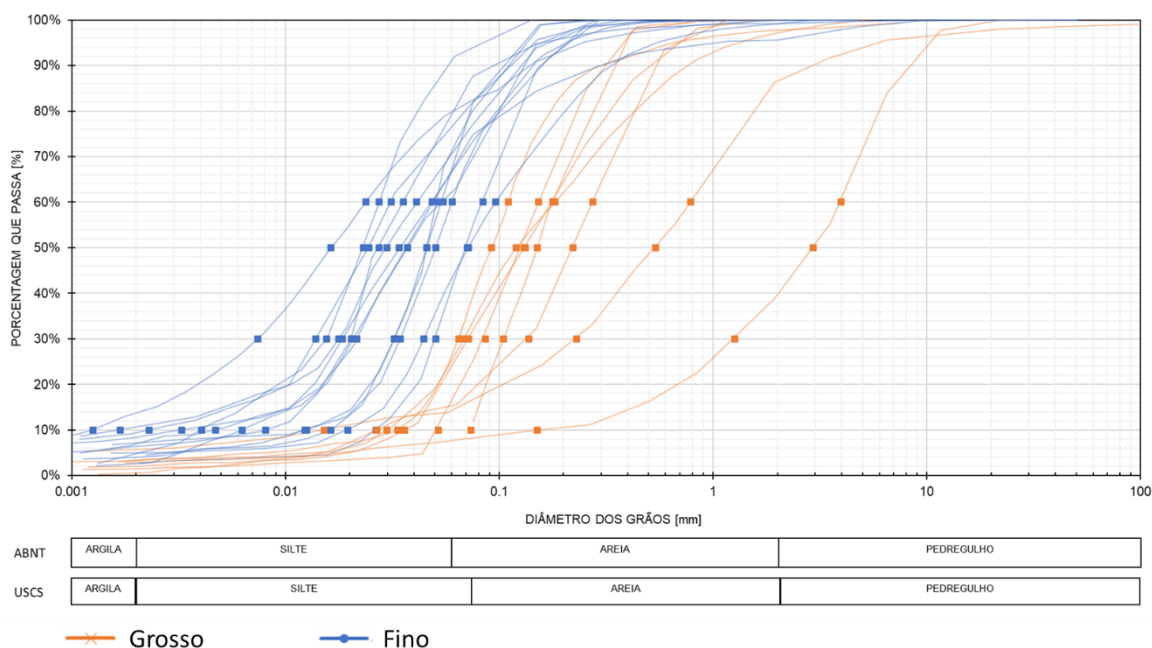


Figura 25 – Curvas granulométricas e pontos aos valores de D10, D30, D50 e D60 das 21 amostras estudadas. (Fonte: Elaborada pela autora).

Tabela 5 – Parâmetros D10, D30, D50, D60 e Cu das amostras. (Fonte: Elaborada pela autora).

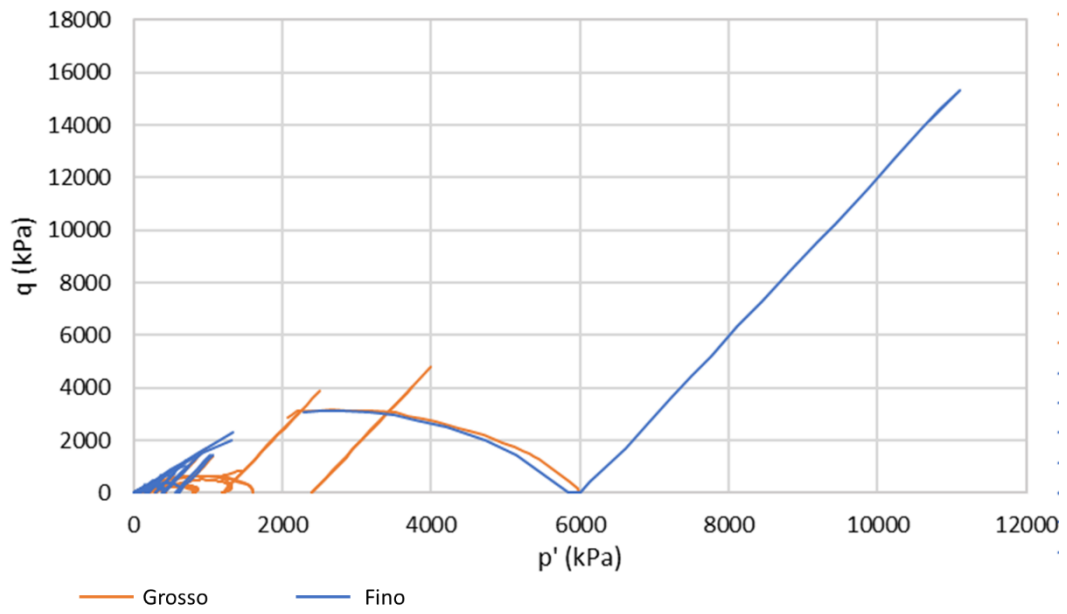
Identificação	D10	D30	D50	D60	Cu
1	0.052	0.086	0.131	0.153	2.948
2	0.036	0.072	0.132	0.179	4.972
3	0.012	0.032	0.046	0.055	4.420
4	0.027	0.050	0.071	0.084	3.170
5	0.015	0.230	0.541	0.785	51.849
6	0.151	1.260	2.950	3.980	26.445
7	0.033	0.065	0.092	0.111	3.306
8	0.005	0.018	0.034	0.049	10.319
9	0.002	0.018	0.030	0.041	24.260
10	0.002	0.014	0.025	0.031	13.547
11	0.074	0.105	0.151	0.179	2.435
12	0.027	0.137	0.221	0.274	10.224
13	0.006	0.021	0.037	0.055	8.712
14	0.004	0.016	0.023	0.027	6.788
15	0.001	0.007	0.016	0.024	18.949
16	0.016	0.032	0.046	0.051	3.128
17	0.020	0.044	0.072	0.097	4.918
18	0.013	0.034	0.051	0.060	4.770
19	0.030	0.068	0.120	0.182	6.074
20	0.008	0.020	0.027	0.036	4.388
21	0.003	0.022	0.037	0.049	14.922

Conforme detalhado no item 2.5 deste trabalho, a LEC de um material é definida a partir da calibração manual dos parâmetros da equação linear (Equação 11) ou da curva simplificada (Equação 12). Esta calibração é feita com base nos resultados dos ensaios triaxiais executados no material. Desta forma, os dados dos ensaios triaxiais foram compilados a fim de verificar a variabilidade de condições de carregamento que os ensaios que embasaram a calibração das LEC foram executados, e, portanto, avaliar a representatividade do banco de dados estudado. Isso porque os RMF são armazenados em diferentes condições de confinamento, a depender da profundidade do reservatório e do peso específico do material armazenado sobre ele. Portanto, um banco de dados representativo deve ser composto por amostras ensaiadas em condições que simulem um amplo intervalo de tensões confinantes.

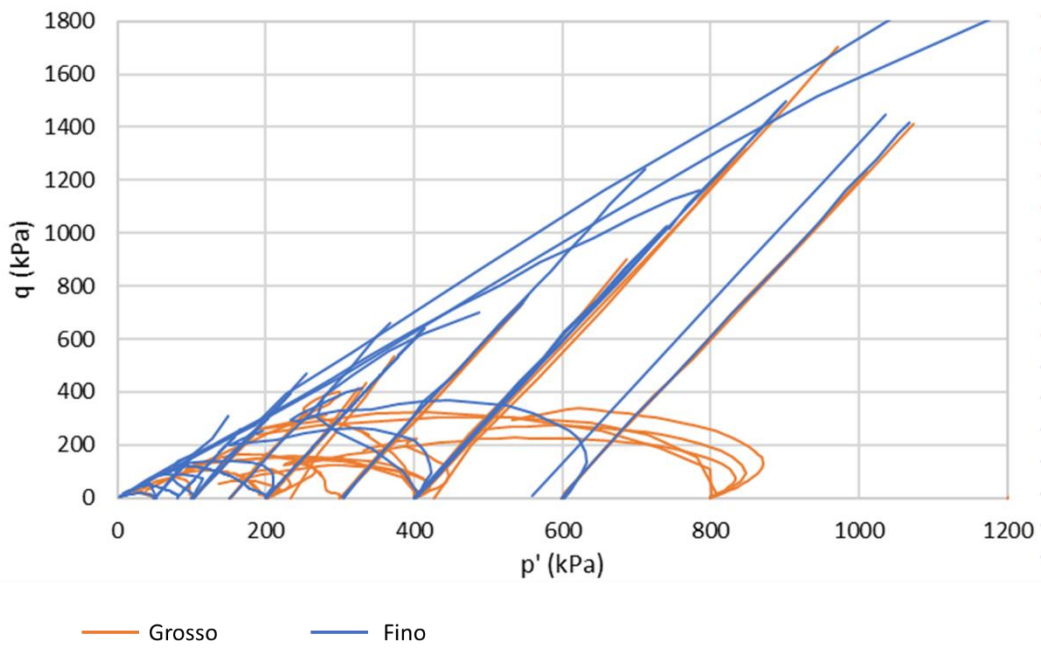
Os ensaios triaxiais analisados foram compilados conforme apresentados nas respectivas publicações das quais foram obtidos os dados. Para algumas amostras não foi possível avaliar todas ou algumas das análises gráficas consideradas neste estudo, uma vez que não foram divulgados os respectivos resultados.

No total, o banco de dados obtido foi embasado nos resultados de 174 ensaios triaxiais, sendo 91 ensaios CID, 12 ensaios CKD, 69 ensaios CIU e 2 ensaios CAU. Destes, foram compilados os resultados de 46 ensaios CID e 37 ensaios CIU, cujo nível de confinamento variou em uma grande faixa de tensões, de 50kPa a 6000kPa. Ao todo foram compiladas 83 curvas de Trajetória de Tensões Efetivas, 83 curvas de Deformação Axial (ϵ_a) vs. Tensão Desviadora (σ_d), 31 curvas de Deformação Axial (ϵ_a) vs. Deformação Volumétrica (ϵ_v) e 29 curvas de Deformação Axial (ϵ_a) vs. Excesso de Poropressão (Δu).

Na Figura 26 são apresentadas as Trajetórias de Tensões Efetivas dos ensaios triaxiais compilados e na Figura 27 são apresentados os pontos de resistência de pico e resistência última registrados nos resultados dos ensaios.

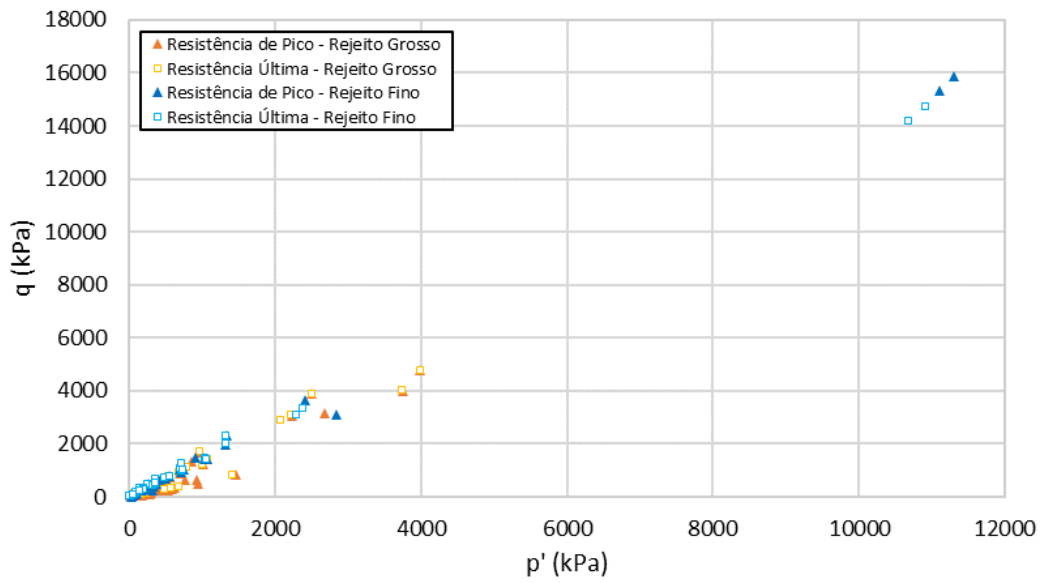


(a)

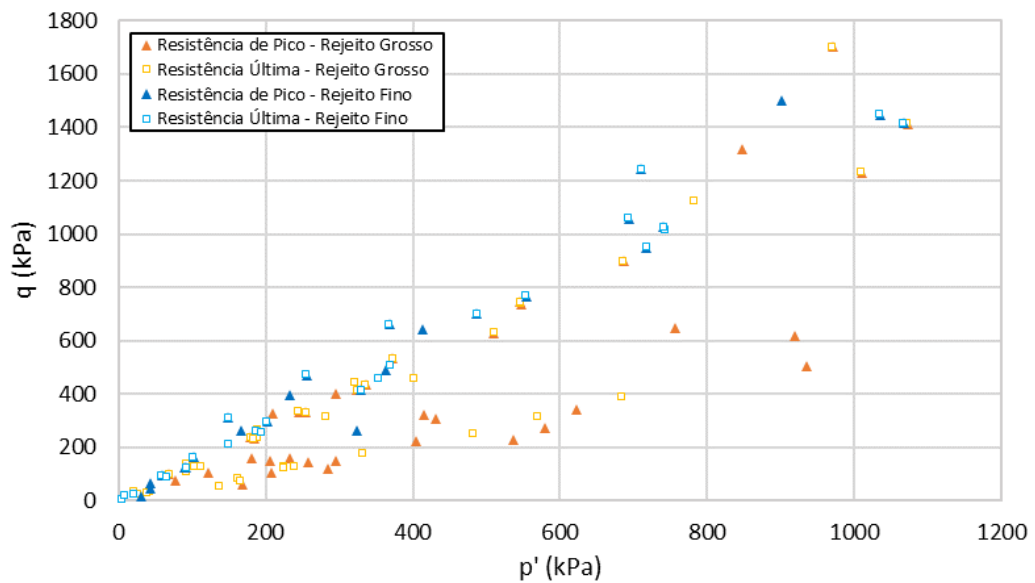


(b)

Figura 26 – Trajetórias de tensões efetivas (a) todos os ensaios compilados e (b) em escala reduzida para melhor representação dos ensaios com nível de confinamento de até 800kPa. (Fonte: Elaborada pela autora).



(a)



(b)

Figura 27 – Pontos de tensão de pico e tensão última de (a) todos os ensaios compilados e (b) em escala reduzida para melhor representação dos ensaios com menores tensões confinantes. (Fonte: Elaborada pela autora).

Portanto, o banco de dados foi considerado representativo das condições de confinamento mais comuns que os rejeitos podem estar submetidos nos reservatórios das barragens de mineração, uma vez que para calibração das LEC analisadas neste estudo foram considerados

ensaios triaxiais executados com grande intervalo de tensões confinantes, variando de 50kPa a 6000kPa.

As amostras estudadas foram ensaiadas a partir de corpos de prova preparados por métodos diferentes e com condições de densidade distintas, ou seja, com relações de índices de vazios iniciais muito discrepantes. Desta forma, não foi considerado relevante para o desenvolvimento deste trabalho analisar a linha de tendência formada pelos pontos de pico destes ensaios ou fazer uma investigação do comportamento do ângulo de atrito e da coesão obtidos de cada grupo de material (rejeito fino e rejeito grosso).

Na Figura 28 são apresentadas as demais curvas compiladas dos resultados de ensaios triaxiais que embasaram a definição dos parâmetros das LEC das 21 amostras analisadas.

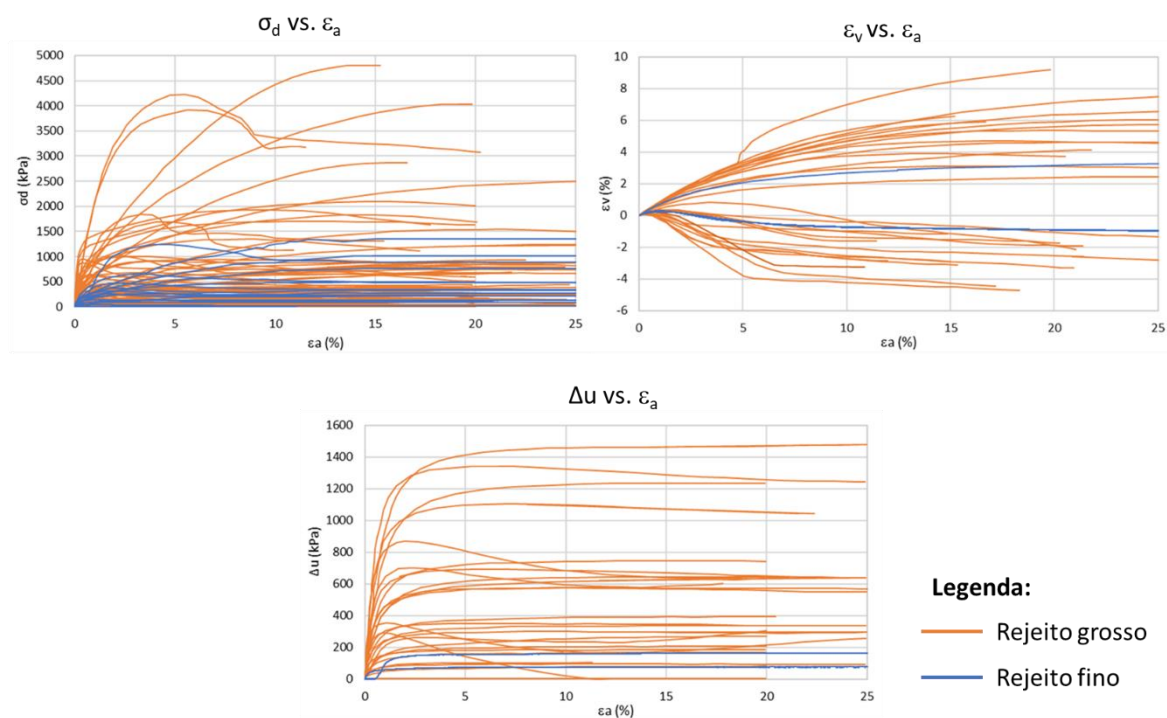


Figura 28 – Curvas (a) Tensão Desviadora vs. Deformação axial, Deformação Volumétrica vs. Deformação axial e Excesso de Poropressão vs. Deformação axial. (Fonte: Elaborada pela autora).

Por fim, foi feita a compilação das LEC definidas pela equação linear (Equação 11) e/ou pela curva simplificada (Equação 12), cujas representações gráficas são apresentadas nas Figura 30 a Figura 32. Também foram compilados os parâmetros das LEC e o quantitativo de ensaios triaxiais considerados na calibração das equações, os quais são apresentados na Tabela 6. As

LEC estudadas foram classificadas quanto a metodologia de obtenção de seus parâmetros conforme descrito abaixo:

A: LEC para as quais obteve-se os parâmetros de ambas as equações (Equação 12: a, b e c, e Equação 11: Γ e λ_e) diretamente da fonte de dados;

B: LEC para as quais obteve-se os parâmetros da equação simplificada (Equação 12: a, b e c) diretamente da fonte de dados. A partir da curva desta equação a autora obteve por calibração manual os parâmetros da equação linear (Equação 11: Γ e λ_e);

C: LEC para as quais obteve-se da fonte de dados apenas figura com a representação gráfica da curva simplificada (Equação 12: a, b e c) no espaço e vs. p' . A representação gráfica foi digitalizada e os pares de pontos obtidos foram plotados formando a curva da LEC simplificada. A partir desta curva a autora obteve por calibração manual os parâmetros de ambas as equações (Equação 12: a, b e c, e Equação 11: Γ e λ_e);

D: LEC para as quais obteve-se os parâmetros da equação linear (Equação 11: Γ e λ_e) diretamente da fonte de dados, e não se obteve os parâmetros da curva simplificada (Equação 12: a, b e c).

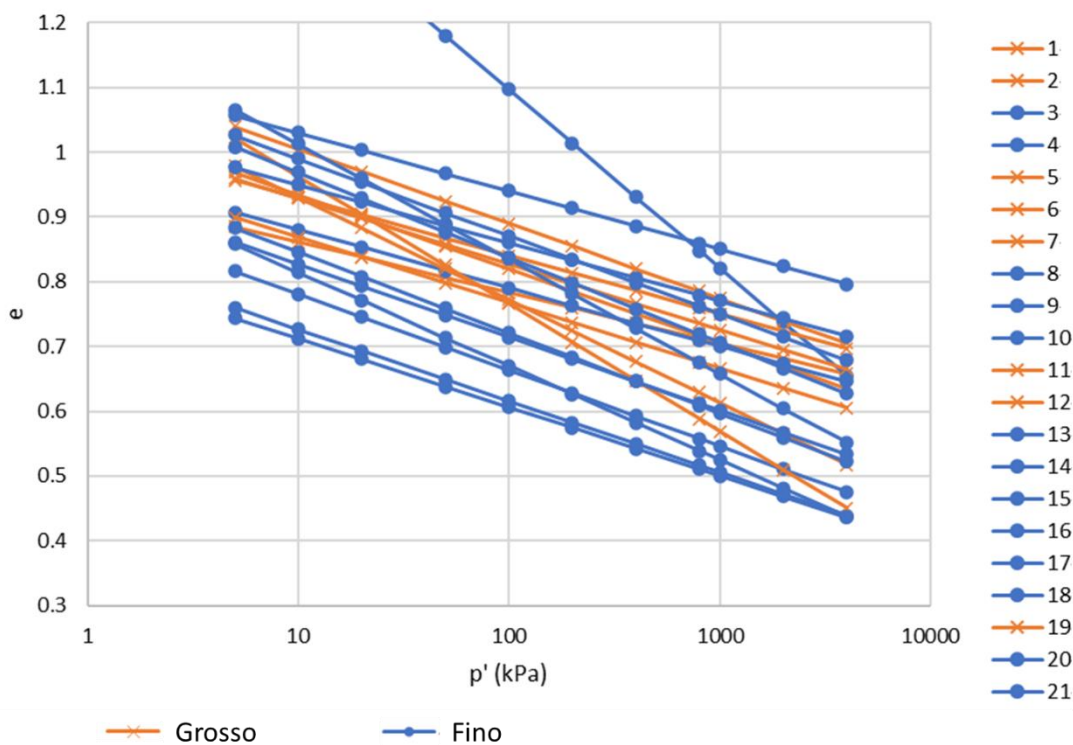


Figura 29 – Curvas LEC linear (Equação 11: Γ e λ_e) compiladas no banco de dados (Fonte: elaborado pela autora).

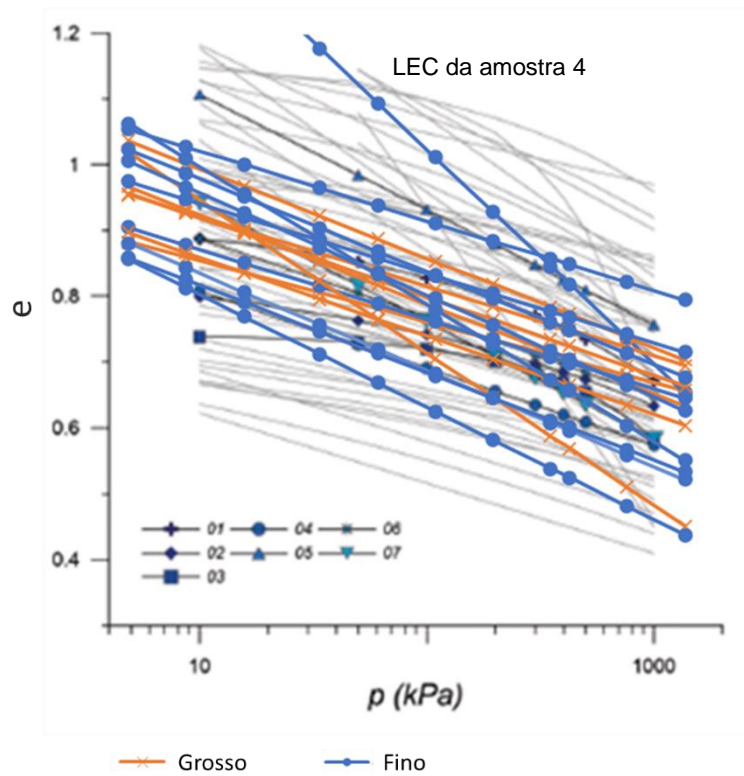


Figura 30 – Curvas LEC linear (Equação 11: Γ e λ_e) compiladas no banco de dados sobrepostas as LEC de rejeitos de mineração apresentadas por Macedo, 2021. (Fonte: modificada de Macedo, 2021).

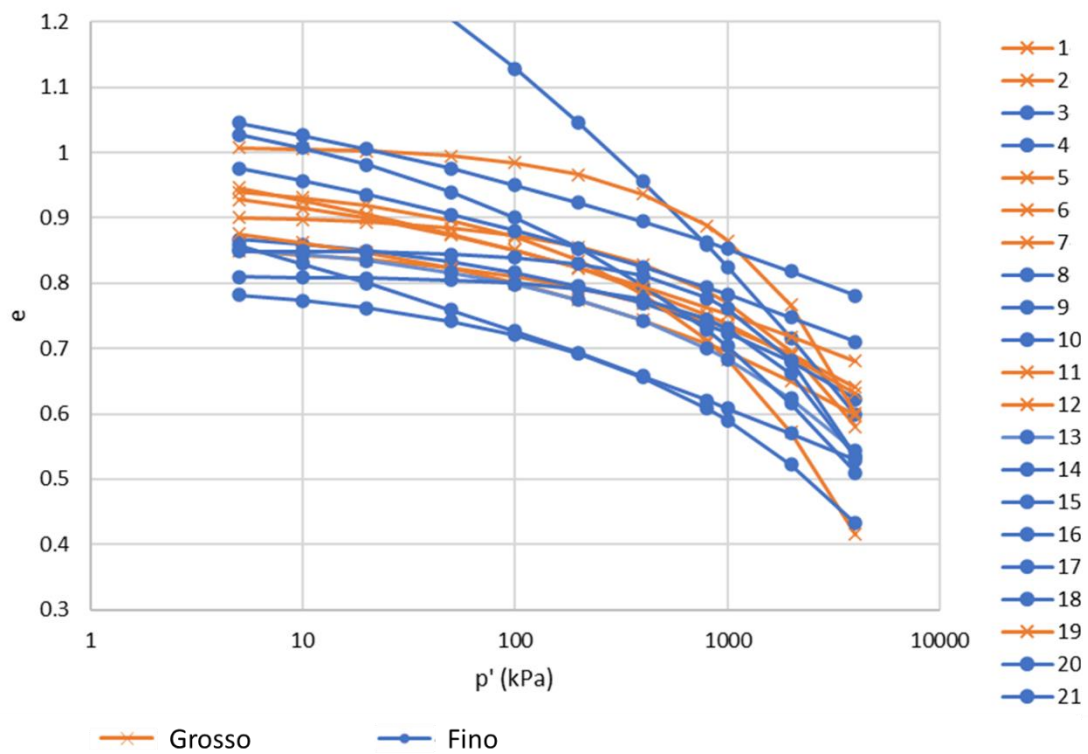


Figura 31 – Curvas LEC simplificadas (Equação 12: a, b e c) compiladas no banco de dados (Fonte: Elaborada pela autora).

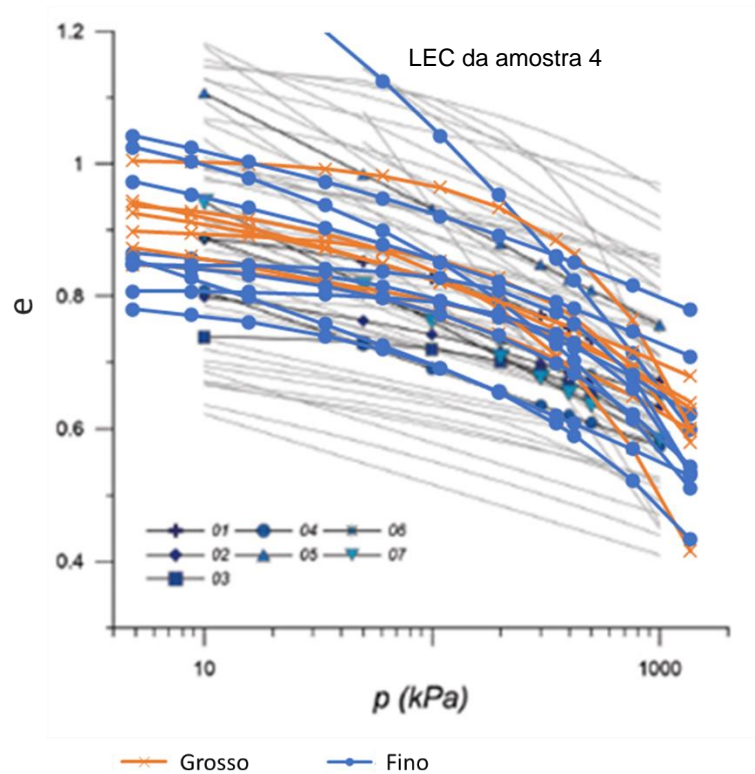


Figura 32 – Curvas LEC simplificadas (Equação 12: a, b e c) (b) compiladas no banco de dados sobrepostas as LEC de rejeitos de mineração apresentadas por Macedo e Vergaray, 2022. (Fonte: modificada de Macedo e Vergaray, 2021).

Tabela 6 – Parâmetros e quantitativo de ensaios considerados na obtenção das LEC estudadas. (Fonte: Elaborada pela autora).

ID	Linha de Estado Crítico					λ_{10}	M_{tc}	ϕ'_{max} (°)	Quantitativo de ensaios triaxiais considerados na obtenção da LEC			Clas.
	$e_c = a + b \left(\frac{p'_c}{p'_{ref}} \right)^c$			$e_c = \Gamma - \lambda_e \ln(p')$					CD	CU	TOTAL	
	a	b	c	Γ	λ_e							
1	0.905	0.032	0.63	1.05	0.050	0.115	1.36	33.67	4	4	8	B
2	0.87	0.061	0.36	0.94	0.034	0.078	1.33	32.98	4	4	8	B
3	0.896	0.08	0.334	0.97	0.039	0.090	1.24	30.92	4	4	8	B
4	2.11	0.983	0.117	1.65	0.120	0.276	1.40	34.58	3	5	8	B
5	0.95	0.15	0.232	0.97	0.044	0.101	1.30	32.3	20	5	25	B
6	1	0.15	0.245	1.03	0.044	0.101	1.35	33.4	20	5	25	B
7	1.01	0.026	0.75	1.12	0.050	0.115	1.35	33.44	0	11	11	C
8	-	-	-	0.8182	0.046	0.106	1.37	33.89	6	2	8	D
9	-	-	-	0.8371	0.048	0.111	1.32	32.75	6	2	8	D
10	-	-	-	0.8985	0.051	0.117	1.27	31.65	8	2	10	D
11	-	-	-	1.09	0.069	0.159	1.35	33.44	1	4	5	D

ID	Linha de Estado Crítico					λ_{10}	M_{lc}	ϕ'_{max} (°)	Quantitativo de ensaios triaxiais considerados na obtenção da LEC			Clas.
	$e_c = a + b \left(\frac{p'_c}{p'_{ref}} \right)^c$			$e_c = \Gamma - \lambda_e \ln(p')$					CD	CU	TOTAL	
	a	b	c	Γ	λ_e							
12	0.96	0.09	0.49	1.16	0.086	0.197	1.40	34.58	4	3	7	C
13	0.874	0.076	0.4	0.97	0.054	0.124	1.36	33.67	5	3	8	C
14	0.81	0.09	0.39	0.96	0.063	0.145	1.41	34.81	5	9	14	C
15	1.539	0.813	0.059	0.94	0.049	0.113	1.39	34.35	5	4	9	B
16	1.13	0.23	0.27	1.19	0.077	0.177	1.35	33.44	8	4	12	B
17	1.22	0.34	0.11	1.04	0.039	0.090	1.38	34.12	11	5	16	A
18	1.29	0.34	0.11	1.12	0.039	0.090	1.38	34.12	6	4	10	A
19	1.19	0.34	0.11	1.02	0.039	0.090	1.38	34.12	4	1	5	A
20	0.85	0.011	0.91	1.11	0.052	0.120	1.49	36.6	6	4	10	A
21	0.81	0.01	0.9	1.1	0.057	0.131	1.47	36.3	3	2	5	A

Da comparação das LEC de RMF estudadas com as LEC de rejeitos de diversos minérios compiladas por Macedo e Vergaray (2022) é possível observar que as curvas estudadas de forma geral estão dentro do intervalo apresentado. Assim, os parâmetros das LEC analisadas não parecem representar algum material com características muito particulares que poderiam enviesar os resultados. Assim, observa-se também que as amostras de RMF estudadas não aparentam apresentar um comportamento particular da LEC quando comparadas às curvas de outros rejeitos.

Apenas a amostra 4 (do acervo da autora) apresentou curva da LEC com comportamento distinto das demais e das compiladas por Vieira *et. al.* (2023), com maior inclinação. Portanto, se trata de uma amostra com características muito particulares que podem enviesar os resultados, e desta forma possivelmente será identificada como *outliers* a ser descartada das análises.

4.2 Análises

4.2.1 Representatividade da Amostragem

Os parâmetros da Linha de Estado Crítico (LEC) de um material são definidos pela calibração manual da equação afim de melhor aproximar a curva dos pontos de índices de vazios obtidos de ensaios triaxiais. Portanto, o número de ensaios triaxiais executados e utilizados na determinação dos parâmetros está diretamente relacionado com a representatividade da LEC quanto ao comportamento do índice de vazios crítico do material

em diferentes tensões. Isso porque um maior número de pontos/ensaios possibilita uma calibração mais precisa da curva.

Neste sentido, a fim de avaliar a representatividade expressa pelos parâmetros das LEC compiladas, avaliou-se o quantitativo de ensaios considerados pelos respectivos autores na calibração da equação de cada uma das amostras (Figura 33).

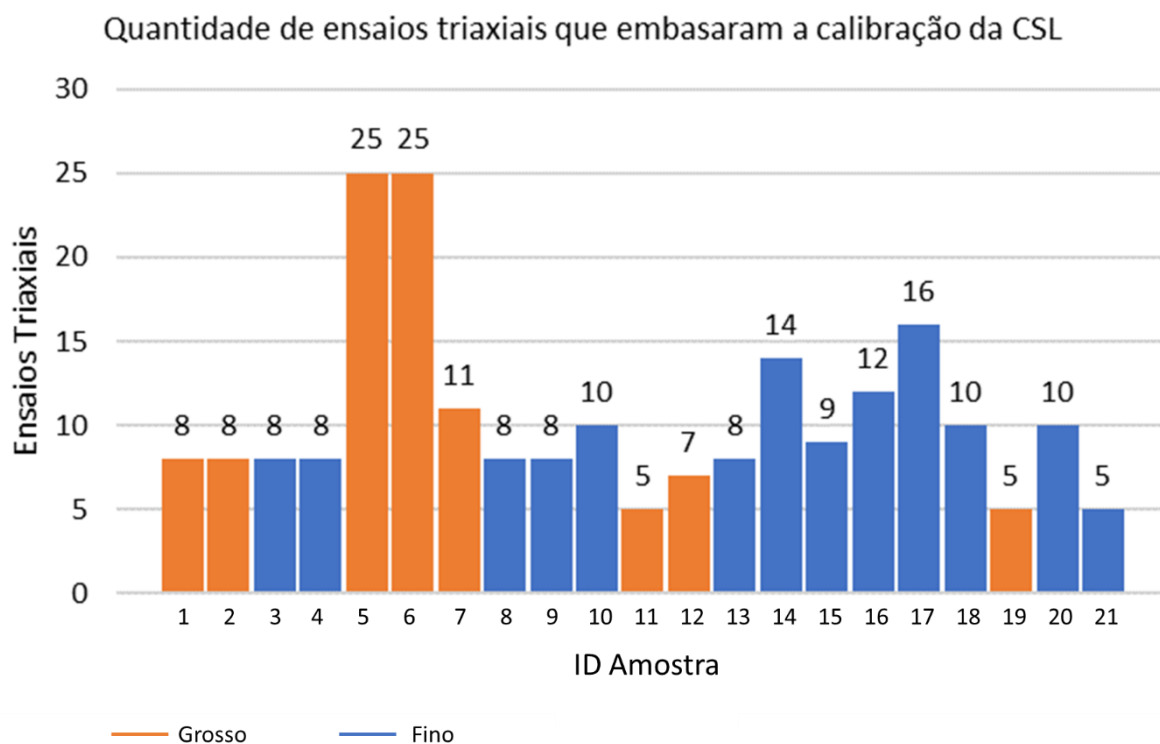


Figura 33 – Quantidade de ensaios triaxiais que embasaram a calibração de cada LEC do banco de dados. (Fonte: Elaborada pela autora).

Do total de amostras estudadas, 13 foram classificadas como representativas de rejeitos finos e 8 foram classificadas como representativas de rejeitos grossos. Observou-se que, de maneira geral, o banco de dados avaliado foi composto por equações cujos parâmetros foram bem embasados. O número mínimo de pontos considerados na calibração das equações foi 5, enquanto o máximo foi 25. Assim, nenhuma das curvas compiladas foi descartada no estudo de verificação da existência de correlações entre as características físicas e os parâmetros da LEC dos RMF devido às quantidades insuficientes de ensaios triaxiais considerados.

Jefferies and Been (2016) conceituam que 10 resultados de ensaios triaxiais configuram um quantitativo de pontos capaz de garantir assertividade na calibração da LEC do material. Desta forma, amostras cuja LEC foi embasada nos resultados de 10 ou mais ensaios foram

consideradas mais representativas das condições críticas observadas para as amostras estudadas. Portanto, os dados dessas amostras podem exercer um impacto mais significativo nas correlações estabelecidas para os rejeitos, uma vez que os respectivos parâmetros tendem a ser mais assertivos e confiáveis.

As amostras que apresentam estas características foram destacadas nas análises para verificação de seu impacto na obtenção de tendências de comportamento dos parâmetros. Para os rejeitos grossos, se enquadram nestas condições as amostras 5, 6 e 7. Já para os rejeitos finos, as amostras 10, 14, 16, 17 e 20 apresentaram LEC embasada em 10 ou mais resultados de triaxiais.

4.2.2 Identificação de *Outliers*

A análise estatística de um banco de dados quantitativo pode ser considerada adequada quando descarta os valores discrepantes que não são representativos do grupo estudado, chamados *outliers*. No caso de estudos com solos, *outliers* são materiais com características físicas ou mineralógicas muito particulares, que não contribuem para a busca de tendências gerais do material. Para a identificação de valores discrepantes entre as amostras do banco de dados estudado, foram feitas análises do tipo *box plot* dos parâmetros físicos e dos parâmetros do estado crítico compilados para os materiais, tendo-se considerado a classificação das amostras em rejeito fino e rejeito grosso (Figura 34 a Figura 37).

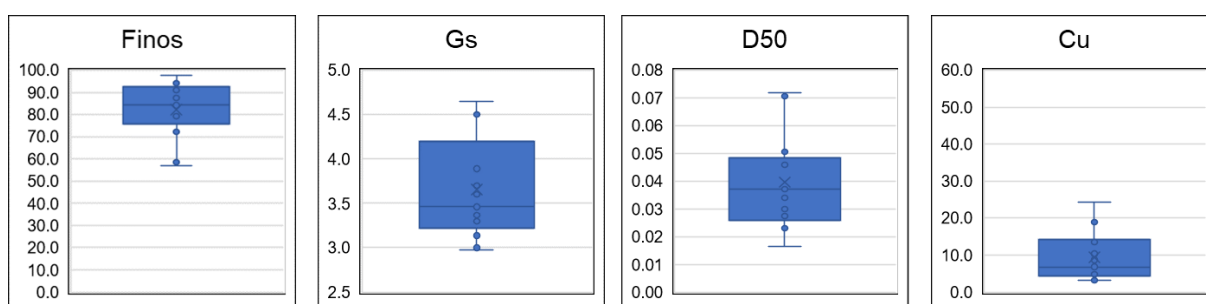


Figura 34 – Box plot – Parâmetros físicos – Rejeito fino. (Fonte: Elaborada pela autora).

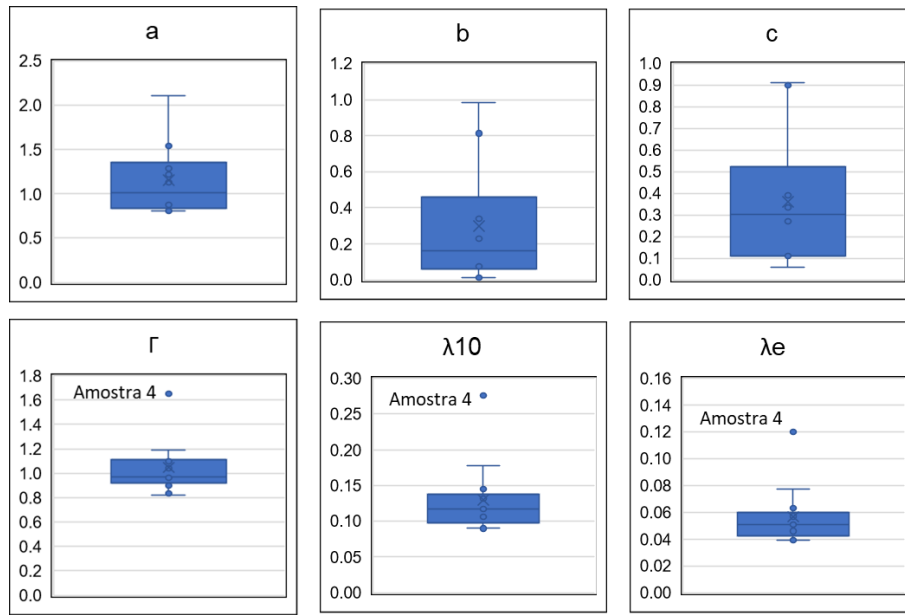


Figura 35 – Box plot – Parâmetros da LEC – Rejeito fino. (Fonte: Elaborada pela autora).

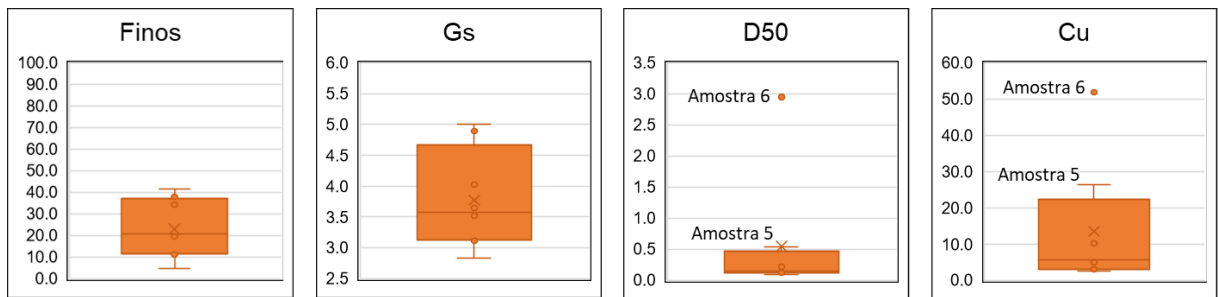


Figura 36 – Box plot – Parâmetros físicos – Rejeito grosso. (Fonte: Elaborada pela autora).

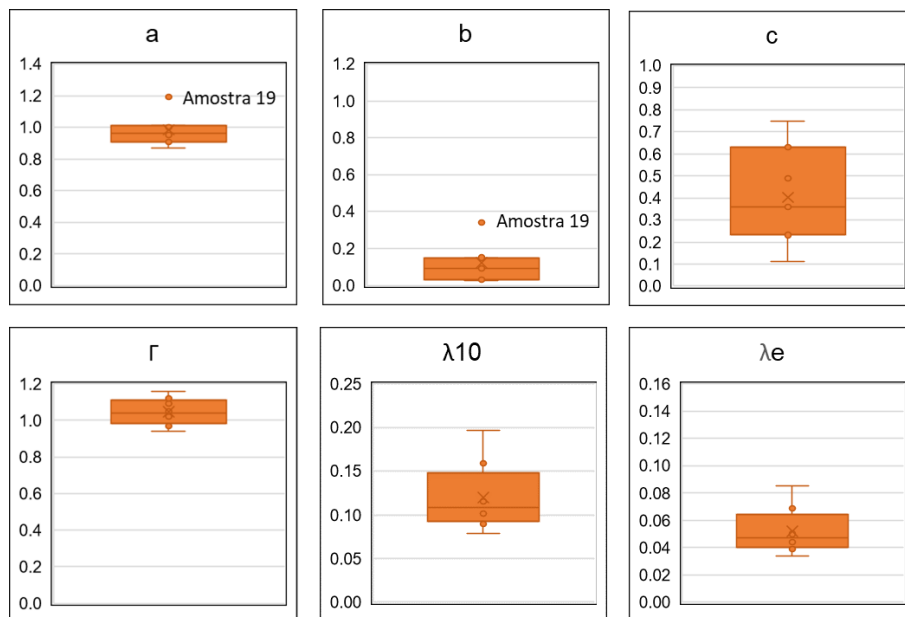


Figura 37 – Box plot – Parâmetros da LEC – Rejeito grosso. (Fonte: Elaborada pela autora).

A partir da análise dos *box plots* obtidos para o banco de dados, é possível observar que para o rejeito fino a amostra 4 apresenta valores discrepantes em relação as demais amostras deste grupo para os parâmetros da LEC λ_c e λ_{10} . Além disso, conforme apresentado no 4.1, esta é a única amostra que apresenta comportamento da LEC discrepante das demais estudadas e das compiladas por Macedo e Vergaray (2022), sendo um material com características muito específicas em comparação com os demais da amostragem estudada. Desta forma, esta amostra foi descartada na verificação de correlação entre os parâmetros do rejeito fino.

Já para o rejeito grosso, observa-se que as amostras 5 e 6 apresentam valores discrepantes em relação às demais para os parâmetros físicos D50 e Cu. Conforme apresentado no item 4.1, este comportamento particular destas amostras pode ser observado também na comparação das respectivas curvas granulométricas com as curvas das demais, onde é possível observar que se trata de um material mais grosso que o restante da amostragem estudada, com características muito específicas de distribuição do tamanho das partículas. Assim, mesmo tendo seus parâmetros embasados nos resultados de 25 ensaios triaxiais cada, ambas foram descartadas das análises dos parâmetros do rejeito grosso.

A amostra 19 do rejeito grosso apresentou valor de parâmetros a e b discrepante em relação aos valores obtidos para as demais do rejeito grosso. Entretanto, estes valores não pareceram comprometer as correlações analisadas para estes parâmetros, conforme será apresentado no item 4.2.4. Além disso, da análise dos parâmetros físicos desta amostra (apresentados no item 4.1), não foi identificada nenhuma discrepância ou especificidade das características deste material em relação aos demais que justificasse que esta amostra fosse desconsiderada no estudo. Portanto, a amostra não foi descartada a fim de garantir maior diversidade de dados no banco para os demais parâmetros.

4.2.3 Índices Físicos

Em seguida, avaliou-se as características físicas dos dois grupos de amostras estudados, a fim de compreender em qual intervalo de valores dos parâmetros físicos estão as amostras compiladas neste estudo. Inicialmente, foi feita a análise da correlação entre o parâmetro densidade relativa dos grãos (Gs) e granulometria das amostras. Os resultados desta análise são apresentados na Figura 38.

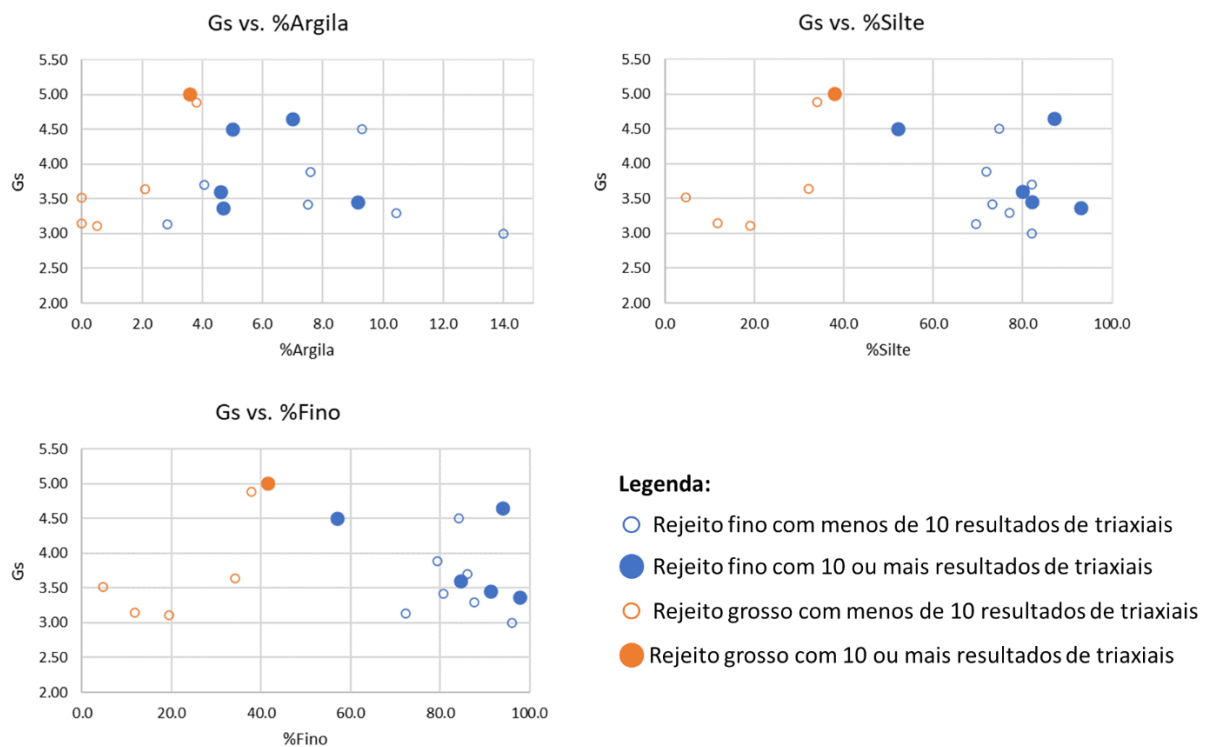


Figura 38 – Análise da relação entre os parâmetros Gs e o Percentual de Siltes, de Argila e de Finos dos rejeitos estudados. (Fonte: Elaborada pela autora).

Da análise gráfica dos resultados (Figura 38), observa-se que de forma geral as amostras apresentam pequenos percentuais de argila, variando de 0,00 a 4,00% para o rejeito classificado como grosso, e de 2,85 a 14,00% para o rejeito classificado como fino. O percentual de silte nas amostras estudadas é mais significativo, variando de 4,80 a 38,00% para o rejeito grosso, e de 52,00 a 93,00% para o rejeito fino. A distribuição granulométrica observada no banco de dados é condizente com a apresentada por Vieira *et. al.* (2023) para amostras de RMF. Conforme apresentado na Tabela 2 deste trabalho, os autores concluem que o material é tipicamente composto por areia fina e silte.

Foi feita também a análise estatística para obtenção dos valores de mínimo, máximo, média, mediana e percentil 75 dos parâmetros físicos Gs, D50 e Cu das amostras de RMF estudadas (Tabela 7).

Tabela 7 – Análises estatísticas dos parâmetros físicos Gs, D50 e Cu dos rejeitos finos e grossos. (Fonte: Elaborada pela autora).

	Gs		D50		Cu	
	Rejeito Fino	Rejeito Grosso	Rejeito Fino	Rejeito Grosso	Rejeito Fino	Rejeito Grosso
Mínimo	3.00	3.11	0.02	0.09	3.13	2.44
Máximo	4.65	5.01	0.07	0.22	24.26	10.22
Média	3.71	2.19	0.04	0.14	9.93	4.99
Mediana	3.53	3.58	0.04	0.13	7.75	4.14
Percentil 75	4.35	4.92	0.05	0.17	14.58	7.11

Observa-se que, de forma geral, os materiais analisados apresentam elevada massa específica dos grãos (Gs), variando entre 3,00 e 5,01. Este intervalo obtido é coerente com o valor médio de 3,66 obtido por Vieira *et. al.* (2023) considerando diferentes amostras de RMF apresentado na Tabela 2 deste trabalho.

Além disso, observa-se que as amostras apresentam intervalo de diâmetro médio das partículas (D50) entre 0,02 mm (silte, segundo a classificação ABNT) a 0,22mm (areia fina, segundo a classificação ABNT). Portanto, de forma geral o material apresenta percentual de finos significativo em sua composição.

Também é possível observar que o coeficiente de uniformidade das partículas apresenta grande intervalo de variação, entre 2,44 e 24,26, indicando que a amostragem considerada compreende amostras consideradas uniformes (com $C < 5,00$) e amostras bem graduadas com elevados valores de Cu. Portanto, a amostragem estudada representa rejeitos de minério de ferro com grande variabilidade de condições de uniformidade granulométrica.

4.2.4 Relação entre a LEC e os Índices Físicos

A fim de avaliar os parâmetros de estado crítico obtidos para os RMF considerados na amostragem, foi feita a análise dos respectivos M_{tc} em comparação com a compilação dos valores deste parâmetro para rejeitos de diversos minerais compilados e apresentados por Macedo e Vergaray (2022). O histograma com a frequência de valores de M_{tc} é apresentado na Figura 39 abaixo.

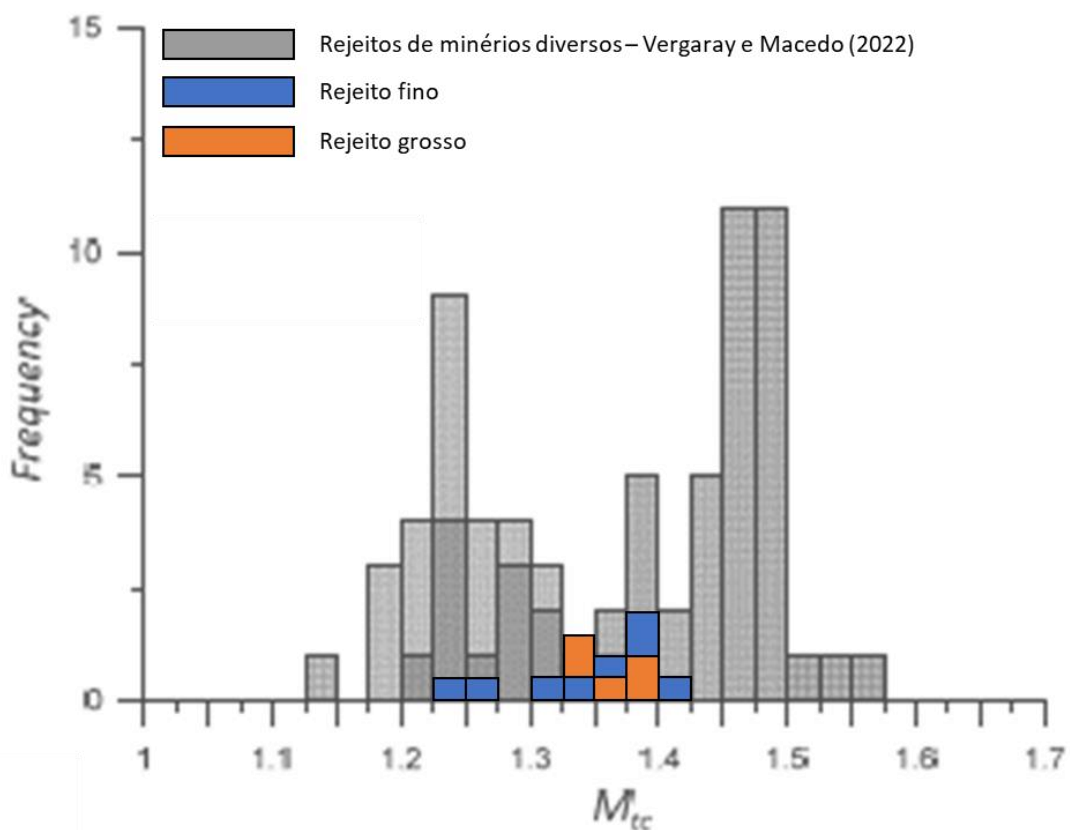


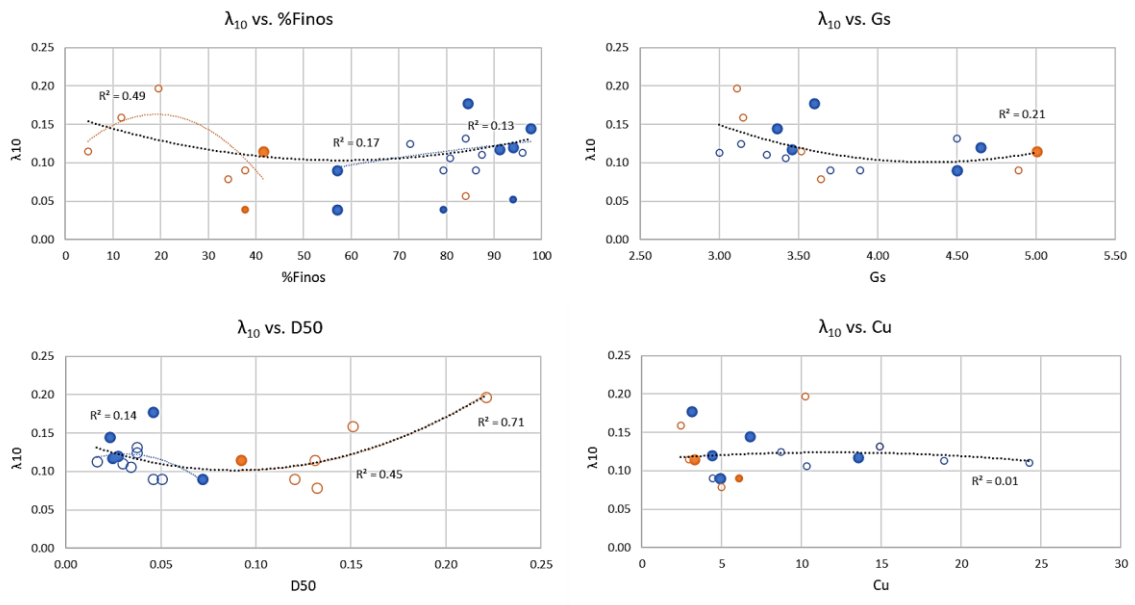
Figura 39 – Histograma – Frequência dos valores de M_{tc} compilados das amostras de RMF classificado como fino e como grosso comparada com a apresentada por Macedo e Vergaray(2022) para rejeitos de diversos minérios. (Fonte: Modificado de Macedo e Vergaray, 2022).

Desta análise conclui-se que os valores de M_{tc} das amostras de RMF estudadas estão dentro do intervalo obtido por Macedo e Vergaray (2022) em sua compilação do parâmetro de rejeitos de diversos minérios.

Por fim, foi avaliada a correlação entre os parâmetros da LEC e os parâmetros físicos das amostras. Nesta análise foram avaliados de forma conjunta os dados de todas as amostras consideradas representativas para o banco de dados estudado. Essas foram utilizadas para obter as correlações com os parâmetros físicos analisados (%Finos, Gs, D50 e Cu). Para os parâmetros percentual de finos e D50 a análise também foi feita considerando a divisão das amostras entre rejeito fino e rejeito grosso, uma vez que estes parâmetros apresentam diferenças de comportamento mais claras quando comparados grupos de materiais com granulometrias diferentes.

As correlações obtidas são apresentadas conforme listado:

- Figura 40 e Figura 41: λ_{10} e Γ da LEC linear (Equação 11);
- Figura 42 a Figura 44: a, b e c da LEC simplificada (Equação 12);
- Figura 45: Mtc com os parâmetros físicos avaliados (%Finos, o Gs, o D50 e Cu).



Legenda:

- Rejeito fino com menos de 10 resultados de triaxiais
- Rejeito grosso com menos de 10 resultados de triaxiais
- Rejeito fino com 10 ou mais resultados de triaxiais
- Rejeito grosso com 10 ou mais resultados de triaxiais

Figura 40 – Análise da relação entre os parâmetros físicos percentual de finos, Gs, D50 e Cu e o parâmetro λ_{10} da equação da LEC dos rejeitos dos rejeitos estudados. (Fonte: Elaborada pela autora).

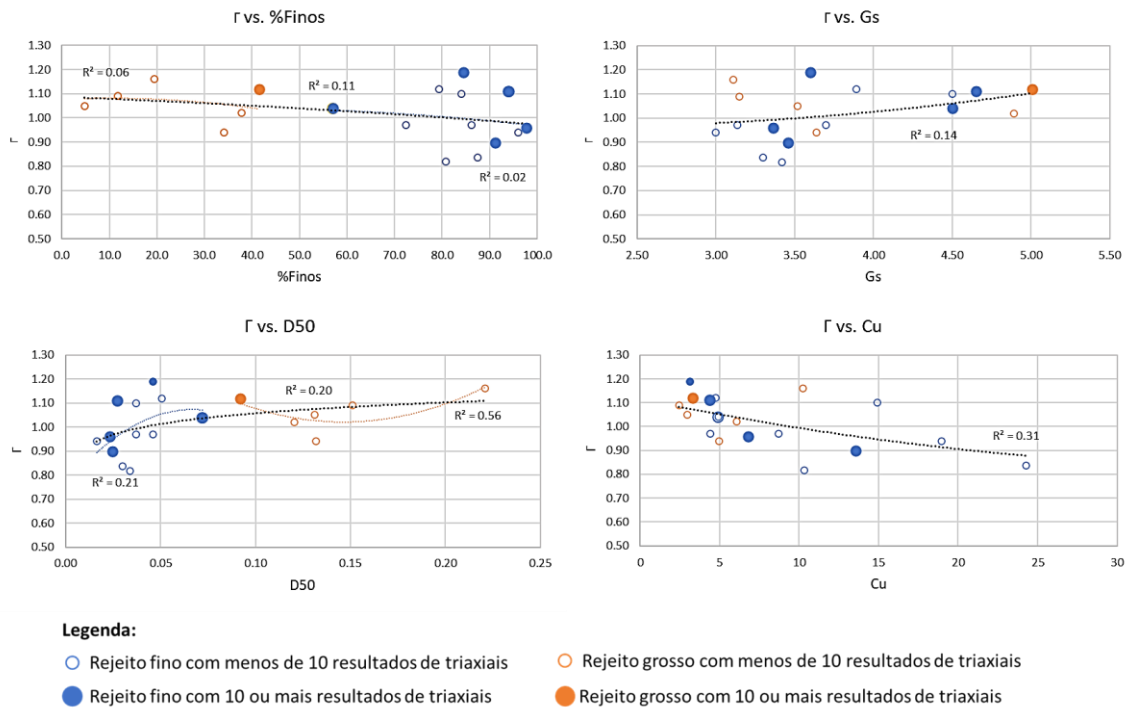


Figura 41 – Análise da relação entre os parâmetros físicos percentual de finos, Gs, D50 e Cu e o parâmetro Γ da equação da LEC dos rejeitos dos rejeitos estudados. (Fonte: Elaborada pela autora).

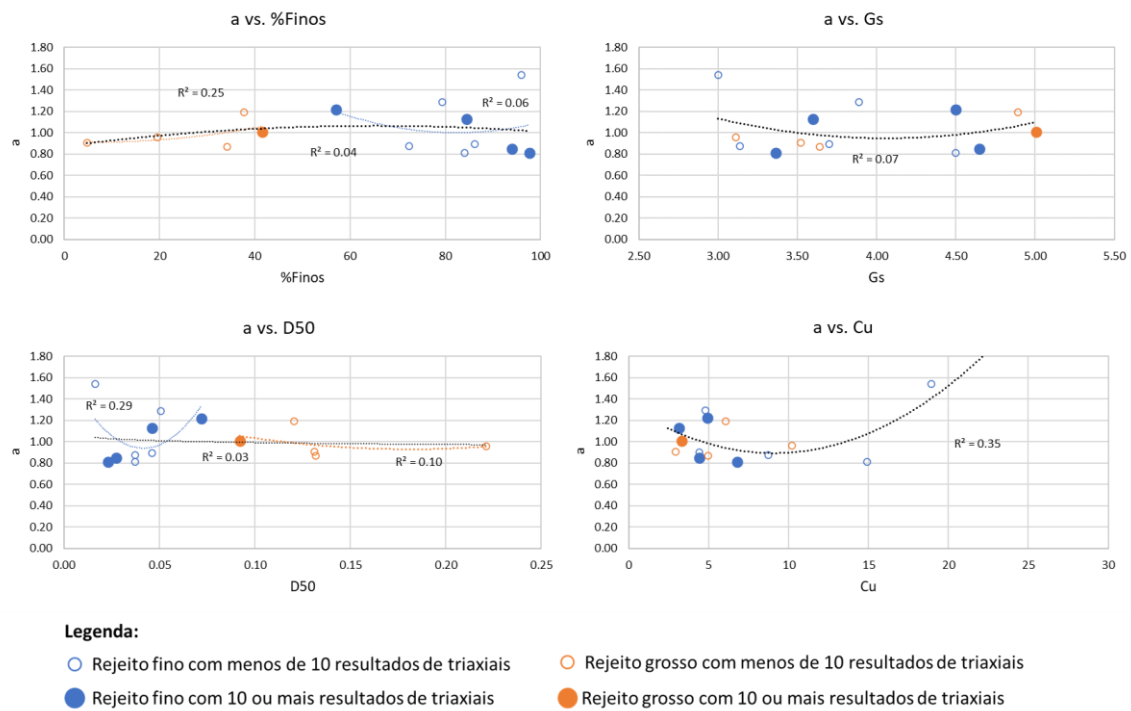


Figura 42 – Análise da relação entre os parâmetros físicos percentual de finos, Gs, D50 e Cu e o parâmetro a da equação da LEC dos rejeitos dos rejeitos estudados. (Fonte: Elaborada pela autora).

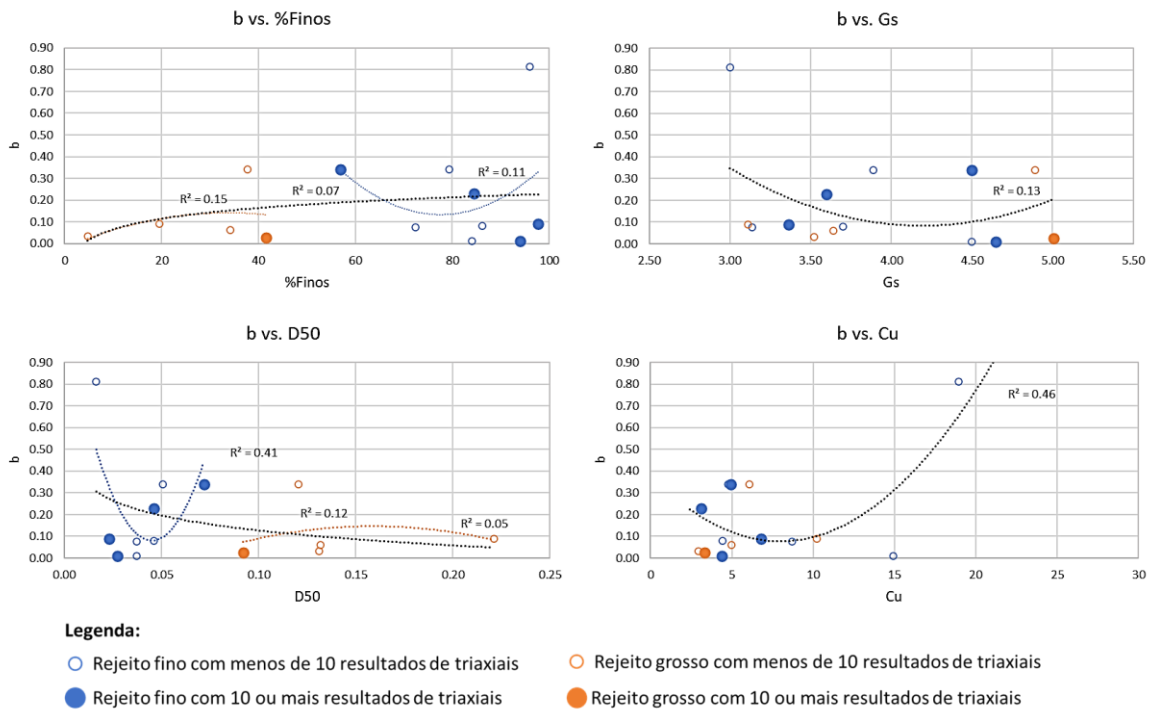


Figura 43 – Análise da relação entre os parâmetros físicos percentual de finos, Gs, D50 e Cu e o parâmetro b da equação da LEC dos rejeitos dos rejeitos estudados. (Fonte: Elaborada pela autora).

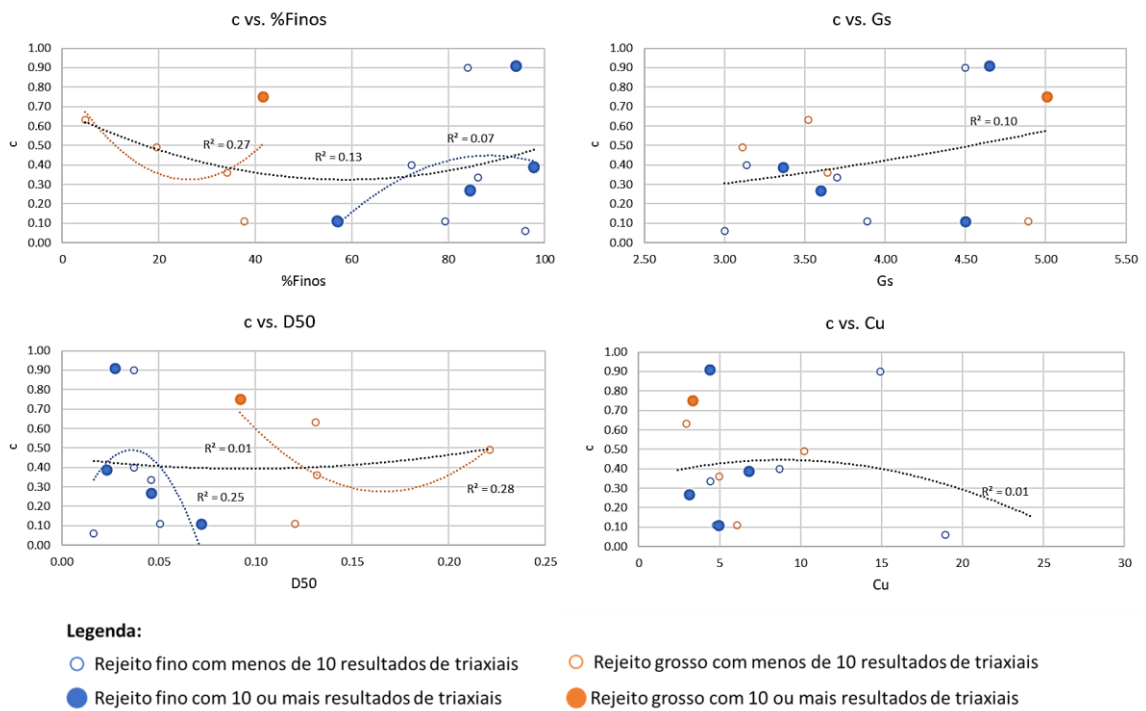


Figura 44 – Análise da relação entre os parâmetros físicos percentual de finos, Gs, D50 e Cu e o parâmetro c da equação da LEC dos rejeitos dos rejeitos estudados. (Fonte: Elaborada pela autora).

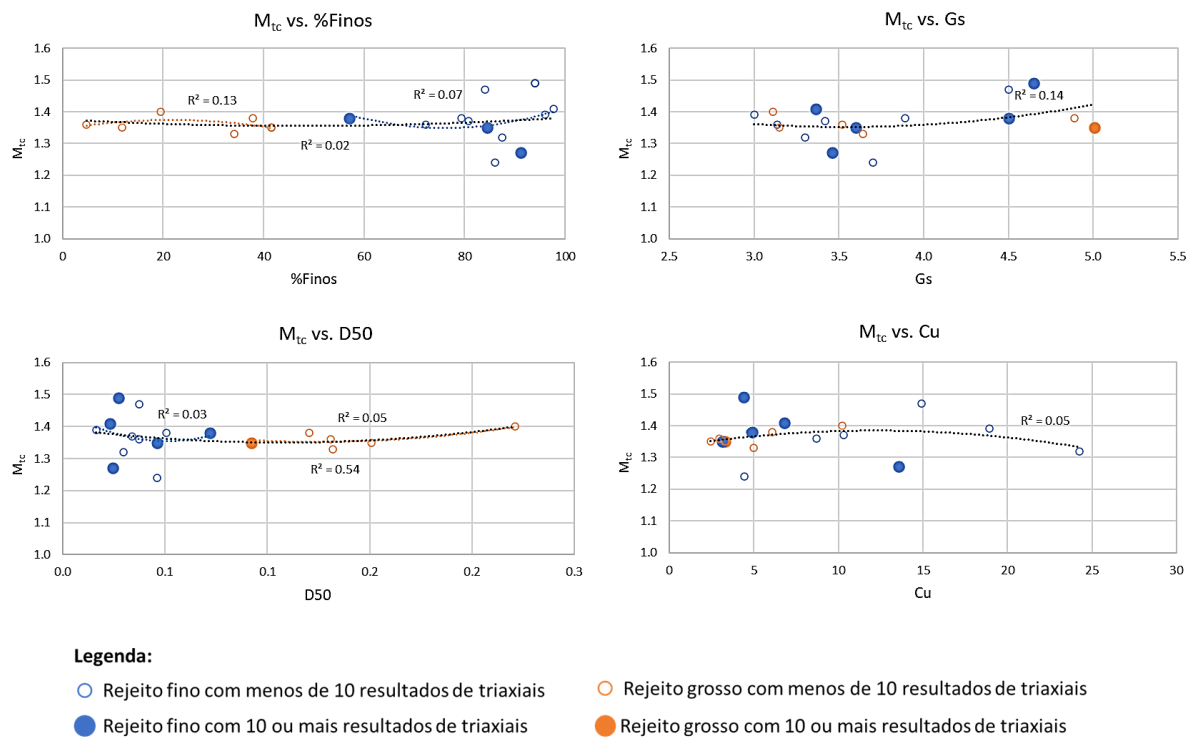


Figura 45 – Análise da relação entre os parâmetros físico percentual de finos, Gs, D50 e Cu e o parâmetro c da equação da LEC dos rejeitos dos rejeitos estudados. (Fonte: Elaborada pela autora).

Nas Tabela 8 e Tabela 9 abaixo é apresentado um compilado da dispersão das correlações obtidas expressa pelo coeficiente de determinação R^2 obtido para cada tendência de comportamento dos parâmetros estudados.

Tabela 8 – R^2 das tendências de percentual de finos e D50 para o rejeito fino e para o rejeito grosso. (Fonte: Elaborada pela autora).

Índices Físicos	Rejeito Fino					Rejeito Grosso				
	λ_{10}	Γ	a	b	c	λ_{10}	Γ	a	b	c
Percentual de finos	0.13	0.02	0.06	0.11	0.13	0.49	0.06	0.25	0.15	0.27
D50	0.14	0.21	0.29	0.41	0.25	0.71	0.56	0.10	0.05	0.28

Tabela 9 – R^2 das tendências de Gs e Cu para o RMF. (Fonte: Elaborada pela autora).

	Rejeitos ¹					
	λ_{10}	Γ	a	b	c	Mtc
Percentual de finos	0.17	0.11	0.04	0.07	0.07	0.02
D50	0.45	0.20	0.03	0.12	0.01	0.05
Gs	0.21	0.14	0.07	0.13	0.10	0.14
Cu	0.01	0.31	0.35	0.46	0.01	0.05

NOTAS:

1: Parâmetros para os quais fez-se a análise conjunta considerando todas as amostras de RMF do banco de dados.

Dentre as linhas de tendência obtidas das correlações entre os parâmetros, algumas são consideradas menos dispersas. Essas são capazes de indicar uma estimativa preliminar razoável do comportamento dos respectivos parâmetros da LEC com base nos índices físicos do RMF. As equações de tendências obtidas para estes parâmetros são apresentadas na Tabela 10 abaixo. Estudos considerando uma amostragem maior podem garantir uma melhor assertividade das equações em relação ao comportamento dos parâmetros.

Tabela 10 – Tendência com melhores correlações obtidas para o rejeito de minério de ferro.
(Fonte: Elaborada pela autora).

Parâmetros correlacionados	Equação	R ² da tendência
Rejeito grosso (%Finos > 50%)		
$\lambda_{10}(\%Finos)$	$\lambda_{10} = -0.0002(\%Finos)^2 - 0.0064(\%Finos) + 0.1015$	0.49
$\lambda_{10}(D50)$	$\lambda_{10} = 5.99(D50)^2 - 1.11(D50) + 0.15$	0.71
$\Gamma(D50)$	$\Gamma = 26.21(D50)^2 - 7.67(D50) + 1.58$	0.56
Rejeito fino (%Finos < 50%)		
$b(D50)$	$b = 505.76(D50)^2 - 45.59(D50) + 1.12$	0.41
Rejeitos		
$\lambda_{10}(D50)$	$\lambda_{10} = 5.60(D50)^2 - 0.99(D50) + 0.15$	0.45
$b(Cu)$	$\lambda_{10} = 0.005(D50)^2 - 0.077(D50) + 0.382$	0.46

De forma geral, é possível observar que há uma grande dispersão entre os parâmetros correlacionados. Essa característica pode ser justificada pela heterogeneidade dos RMF, que apresentam características físicas muito distintas a depender da mineralogia do rejeito, do método de extração, de beneficiamento, de transporte e de armazenagem do material. Além disso, as condições de moldagem dos corpos de prova e dos ensaios de laboratório podem influenciar na obtenção dos parâmetros da LEQ. Assim, a dispersão identificada no banco de dados, expressa pelos baixos valores de R² obtidos, é coerente com a característica diversa dos RMF.

Algumas das correlações obtidas foram comparadas com estudos semelhantes desenvolvidos por autores de referência. Nestes estudos, os autores analisam a existência de correlações entre os parâmetros físicos e os parâmetros da LEC de rejeitos de mineração provenientes do beneficiamento de diferentes minérios. As comparações são apresentadas nas Figura 46 a Figura 50 abaixo.

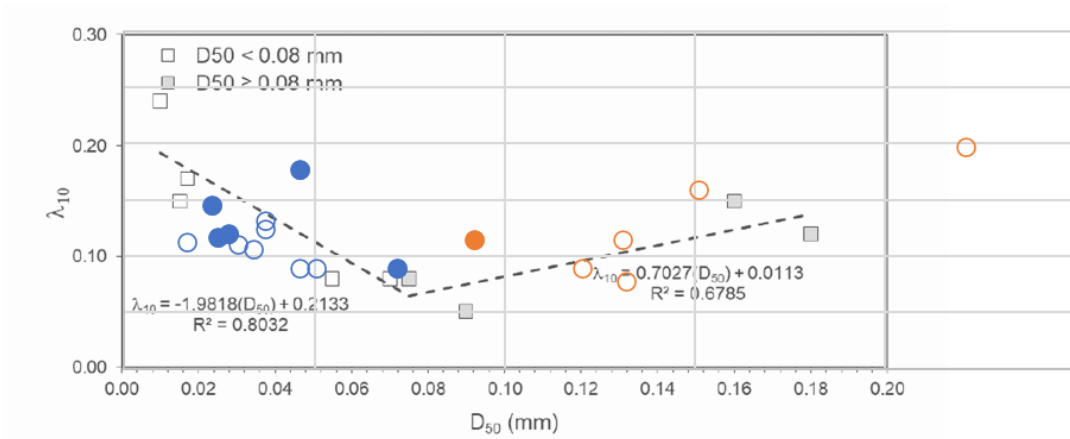


Figura 46 – Correlação entre λ_{10} e D_{50} obtida neste trabalho comparada com a apresentada por Hussien e Sgaoula (2023). (Modificado de: Hussien e Sgaoula, 2023).

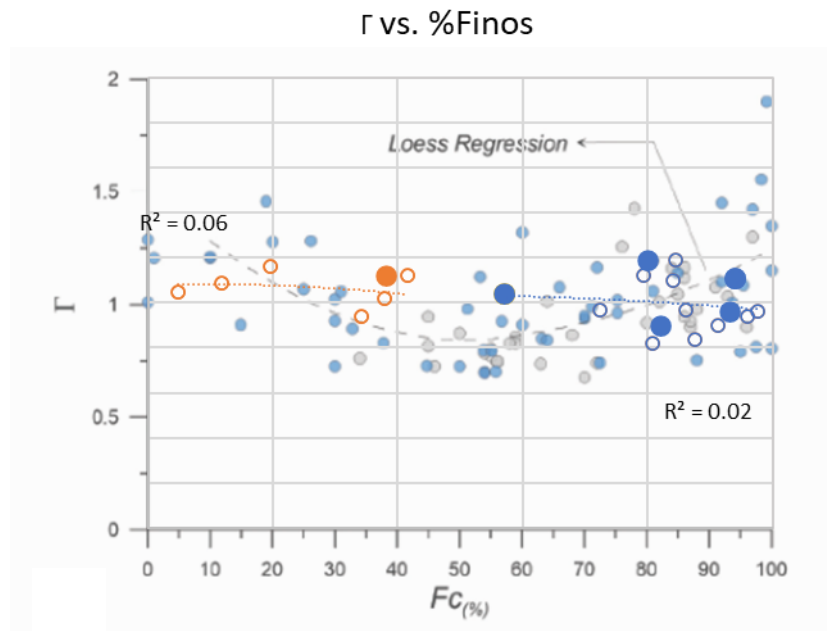


Figura 47 – Correlação entre γ e percentual de finos obtida neste trabalho comparada com a apresentada por Macedo e Vergaray (2023). (Modificado de: Macedo e Vergaray, 2022).

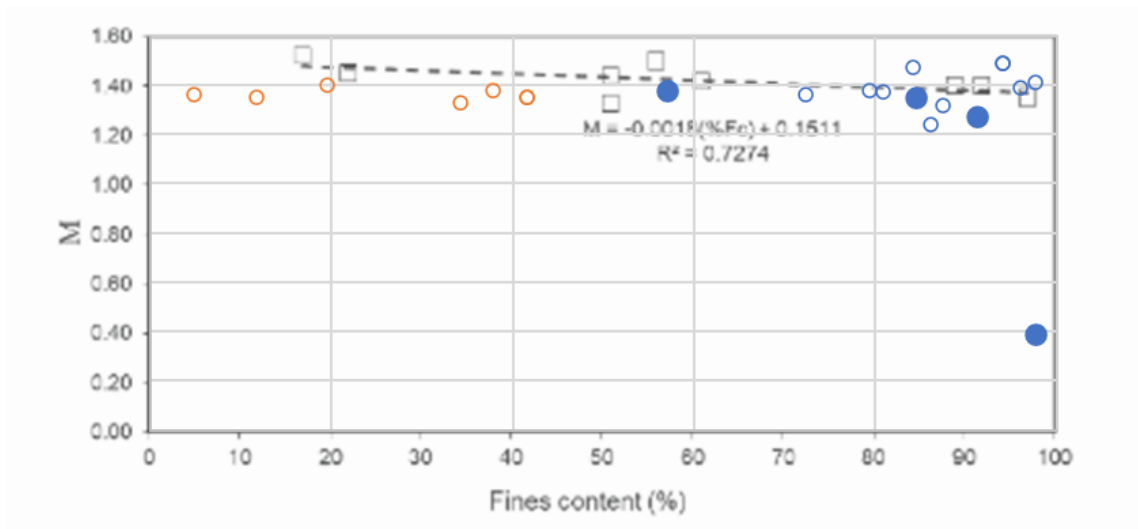


Figura 48 – Correlação entre Mtc e percentual de finos obtida neste trabalho comparada com a apresentada por Hussien e Sgaoula (2023). (Modificado de: Hussien e Sgaoula, 2023).

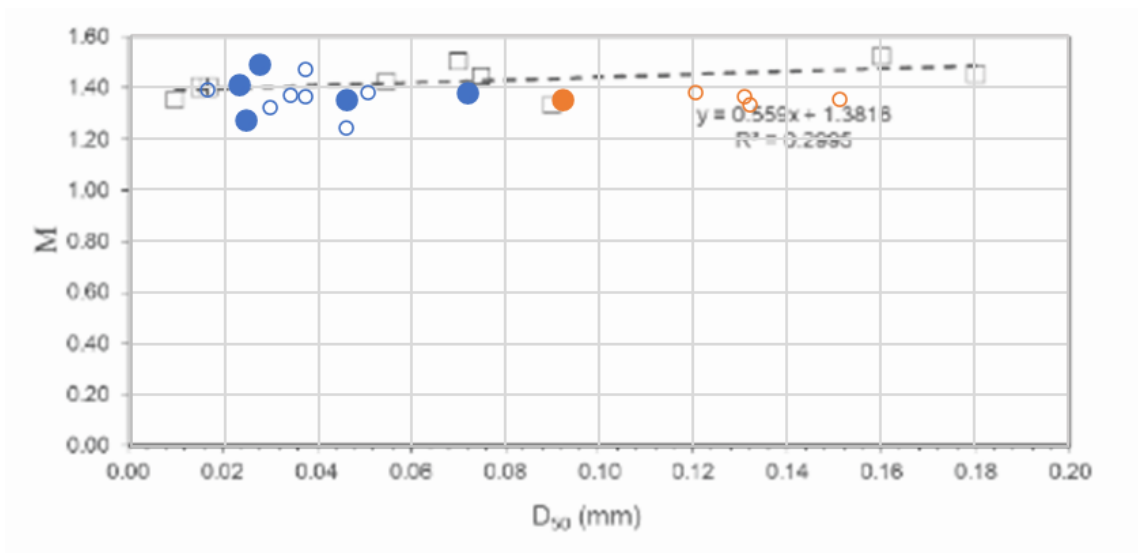


Figura 49 – Correlação entre Mtc e D_{50} obtida neste trabalho comparada com a apresentada por Hussien e Sgaoula (2023). (Modificado de: Hussien e Sgaoula, 2023).

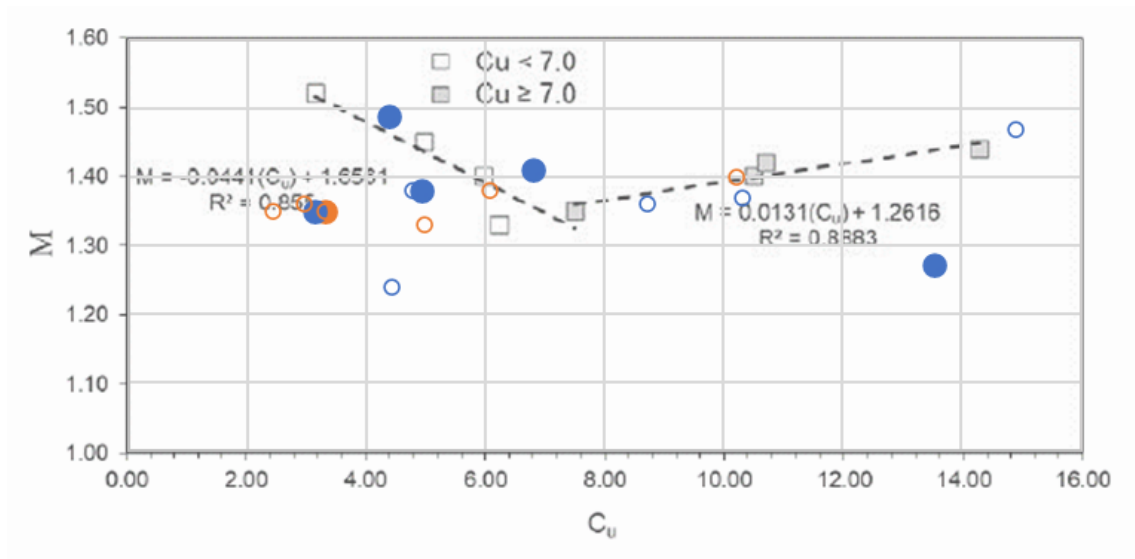


Figura 50 – Correlação entre Mtc e Cu obtida neste trabalho comparada com a apresentada por Hussien e Sgaoula (2023). (Modificado de: Hussien e Sgaoula, 2023).

Ao se comparar os parâmetros obtidos neste trabalho com os parâmetros apresentados em estudos similares para rejeitos de mineração, como em Vieira *et. al.* (2023), Macedo e Vergaray (2022) e Hussien e Sgaoula (2023), observa-se que, para a amostragem considerada, os RMF não apresentam particularidades significativas em comparação com rejeitos de outros minérios. Ou seja, os parâmetros de RMF compilados apresentam valores dentro do intervalo identificado pelos autores de referência.

Portanto, para estudos preliminares é considerado razoável utilizar para o RMF correlações obtidas considerando rejeitos de outros minérios na definição de parâmetros da LEC.

5 CONCLUSÕES

O banco de dados compilado foi analisado e considerado representativo quanto as condições de confinamento as quais o material pode estar submetido nas barragens de armazenamento de rejeito. Isso pois as amostras consideradas tiveram seus parâmetros da LEC embasados em resultados de ensaios triaxiais com tensões de confinamento variando de 50 a 6000kPa. Os parâmetros da LEC também foram considerados representativos uma vez que foram embasados em no mínimo 5 resultados de ensaios triaxiais. Além disso, 9 das 21 amostras estudadas foram embasadas em resultados de 10 ou mais ensaios, quantidade definida por Jefferies e Been (2016) como capaz de garantir assertividade na calibração da LEC do material, e, portanto, foram consideradas mais influentes na obtenção de correlações para os parâmetros.

Das 21 amostras estudadas, 3 apresentaram valores de parâmetros discrepantes em relação as demais, sendo consideradas amostras com características muito específicas e não representativas do grupo de materiais considerados na amostragem estudada. Desta forma, as amostras classificadas como *outliers* foram desconsideradas das análises de verificação de existência de correlações entre os parâmetros.

Da análise dos índices físicos das amostras compiladas observou-se que o rejeito de minério de ferro apresenta correlações dispersas entre os parâmetros. Este comportamento é coerente com a heterogeneidade observada neste material, que apresenta características diferentes a depender da composição do minério bruto, do método de beneficiamento, de disposição e armazenamento, entre outros fatores que influenciam diretamente na mineralogia, microscopia e características físicas do material.

Quando comparados os resultados obtidos com aqueles apresentados no estudo de Macedo e Vergaray (2022) que compila os resultados de 53 amostras de diferentes rejeitos de mineração, é possível observar que considerando a amostragem estudada, o RMF não aparenta possuir comportamento distinto/ muito específico em relação aos demais rejeitos de mineração. Portanto, apesar de apresentar valores de Gs tipicamente mais altos que os demais rejeitos, é considerado razoável adotar para estimativas preliminares correlações entre parâmetros obtidas a partir de outros rejeitos para RMF.

Além disso, foram obtidas algumas boas correlações entre parâmetros físicos dos RMF e

os respectivos parâmetros da LEC. Essas correlações (Tabela 10) podem ser utilizadas em estimativas preliminares de parâmetros da LEC deste material, respeitando as condições de validade das correlações especificadas.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Durante a avaliação da existência de correlações entre os parâmetros físicos dos RMF e as LEC destes materiais, foram observadas algumas possibilidades de melhorias e indicações para investigações mais detalhadas dos comportamentos observados. As sugestões são descritas a seguir:

- Estudo considerando um número maior de amostras: Foi possível observar algumas tendências de comportamento que podem ser melhor investigadas e possivelmente validadas se estudadas considerando um banco de dados com maior número de amostras. Uma maior amostragem implicaria em uma maior representatividade dos diferentes RMF armazenados nas barragens brasileiras, que apresentam diferentes mineralogias e parâmetros físicos, e, portanto, maior representatividade e abrangência dos parâmetros e correlações obtidos para este material.
- Estudo considerando a mineralogia e microscopia do material: A investigação dos RMF considerando a influência de sua mineralogia e a microestrutura nos parâmetros da LEC pode levar a tendências mais assertivas. Isso porque rejeitos com granulometrias semelhantes provenientes de processos minerais diferentes podem apresentar composição mineralógica e microestrutura muito distinta, resultando em um comportamento no estado crítico diferente. Desta forma, sugere-se avaliar a influência da mineralogia e a microestrutura do rejeito nos parâmetros obtidos para a LEC do material.
- Estudo considerando referências de confiabilidade da tendência expressa pelo R^2 : Sugere-se um estudo mais aprofundado na confiabilidade das tendências com base em valores de referência de R^2 . Assim se faz possível atestar a confiabilidade e aplicabilidade das correlações obtidas na estimativa de parâmetros de calibração da LEC.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *Relatório de Segurança de Barragens: 2022*. Brasília, 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. Anuário – Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas – 2022. Brasília, jan. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. *Relatório de Segurança de Barragens 2021*. Brasília, DF, 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. *Report Mensal: Barragens de Mineração - Agosto*. Brasília, ago. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. Resolução nº 95, de 2022. *Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração*. Brasília, DF, 07 fev. 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D2850: *Standard Test Method For Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test On Cohesive Soils*. West Conshohocken, 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D4767: *Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*. West Conshohocken, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D7181: *Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils*. West Conshohocken, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 11682: *Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro, 2009.
- BORGES, J. et. al. *Simulação numérica do modelo de estados críticos (p, q, θ) em aterros sobre solos moles*. Geotecnia: Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, nº 84, 1998.
- CARMIGNANO, O. R. et. al. *Iron Ore Tailings: Characterization and Applications*. Journal of the Brazilian Chemical Society, Vol. 32, No. 10, 1895-1911, 2021.
- CARRIZO, L.; TASSO, N.; SOTTILE, M. *Caracterización geotécnica de un relave minero susceptible a licuar: Geotechnical characterization of a mine tailings susceptible to liquefaction*. In: XXVI CONGRESO ARGENTINO DE MECÁNICA DE SUELOS E INGENIERÍA GEOTÉCNICA, Comodoro: Rivadavia 2023.
- CASAGRANDE. A. *Research on Atterberg Limits of Soils*. Public Roads, 13, 121-136, 1932.
- CELLA, P. R. C.; PADOVANI, F. A. *Five Brazilian Tailings – from laboratory and field data towards safer design criteria*. In: 7th INTERNACIONAL CONFERENCE TAILINGS MANAGEMENT, virtual event, 2021.
- COELHO, R. M. P. et. al. *Atlas das barragens de mineração em Minas Gerais*. Caderno de Geografia, v. 31, Número Especial 1, 2021.
- CONSOLI, N. C. *Critical State Analysis of Two Compacted Filtered Iron Ore Tailings With Different Grading and Mineralogy at Different Stages of Treatment*. Springer, 2023.
- DARLINGTON, et. al. A Tidal Wave of Mud: A mining dam collapsed and buried more than 150 people. Now Brazil is casting an anxious eye on dozens of dams like it. *The New York*

Times, Nova York, 9 fev. 2019. Disponível em: [Brumadinho Dam Collapse: A Tidal Wave of Mud - The New York Times \(nytimes.com\)](https://www.nytimes.com/2019/02/09/us/brumadinho-dam-collapse.html). Acesso em: setembro de 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. *Glossário de Termos Técnicos Rodoviários*. Rio de Janeiro, 1997.

EICHLER-COELHO, P. B. et. al. *Influência do Rompimento da Barragem do Valo Grande (Igrape, SP) nas Associações de Foraminíferos e Tecamebas*. Instituto de Geociências, Portal de Periódicos UFRGS. Disponível em: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/21224>. Acesso em: setembro de 2023.

ENDO, A. D. F. *Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero*. Ouro Preto, MG: Quadrilátero Ferrífero – Centro de Estudos Avançados – UFOP, 2019. Disponível em: [Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero versão 2019, escala 1:150.000: Revisado e atualizado | Quadrilátero Ferrífero 2050 \(ufop.br\)](https://www.ufop.br/geologia/Mapa-Geologico-do-Quadrilatero-Ferrifero-versao-2019-escala-1-150-000-Revisado-e-atualizado-Quadrilatero-Ferrifero-2050-ufop-br). Acesso em: setembro de 2023.

GARNER, S. *Study of the die compaction of powders to high relative densities using the discrete element method*. Elsevier, 2015.

GOMES, A. S. et. al. *Calibração do Modelo Construtivo Norsand para Análise do Descomissionamento de Barragem de Rejeito*. São Paulo: COBRAMSEG, 2022.

HUSSIEN, M. N; SGAOULA, J. *Tailings State from Basic Laboratory Tests and CPT Data*. In: PROCEEDINGS OF TAILINGS AND MINE WASTE, Vancouver, Canada. 2023.

INSTITUTO AÇO BRASIL – IAB. *Aço Brasil: Uma Viagem Pela Indústria do Aço*. Belo Horizonte, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. *Mineração em Números: 1S23*. Brasília, 2023.

JEFFERIES, M.; BEEN, K.; *Soil Liquefaction: A Critical State Approach*. 2. ed. Taylor & Francis Group, 2016.

LI, W; COOP, M. R; *Mechanical behaviour of Panzhihua iron tailings*. Can. Geotech Journal, 2019.

MACHADO, Mariela. P. *O processo de contato com dois tipos de partículas e prioridade*. Notas de Aula: Instituto de Matemática de Estatística, USP, 2021.

MACEDO, Jorge; VERGARAY, Luis. *Properties of mine tailings for static liquefaction assessment*. Can. Geotech Journal, 2022.

MENEZES, S. A. B. Daisy. *Classificação dos Danos Decorrentes da Ruptura de Barragens de Acumulação de Água. Estudo de Caso: Barragem de Santa Helena – BA*. 2016. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

MINAS GERAIS (Estado). *Histórico do rompimento das barragens da Vale na Mina Córrego do Feijão*. 2019. Disponível em: [Histórico do rompimento das barragens da Vale na Mina Córrego do Feijão | MG.GOV.BR - Pró-Brumadinho \(www.mg.gov.br\)](https://www.mg.gov.br/historico-do-rompimento-das-barragens-da-vale-na-mina-corrego-do-feijao). Acesso em: setembro de 2023.

MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL – MPF. *Caso Samarco: O Desastre*. 2015. Disponível em: [O desastre — Caso Samarco \(mpf.mp.br\)](https://www.mpf.br/caso-samarco). Acesso em: setembro de 2023.

- MONTEIRO, V. S. et. al. *Qualidade da Água Após Impacto do Rompimento da Barragem São Francisco*. Belo Horizonte: V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2014.
- MONTOGOMERY, D. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. 7. ed. São Paulo: LTC, 2021.
- MORGENSTERN, N. R. *Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão*. Samarco: Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão, 2016.
- NETO, J. V. et. al. *Boxplot: um Recurso Gráfico para a Análise e Interpretação de Dados Quantitativos*. ISSN 1981-3708. Odontol Bras Central, 2017.
- NETO, L. V. *Estudo de ruptura da barragem da Pampulha, em Belo Horizonte: retroanálise da brecha do acidente de 1954 e ruptura hipotética nas condições atuais*. 2016. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais.
- ORTIGÃO, J. A. R. *Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos*. 3. ed. Terratek, 2007.
- PALMEIRA, Rafael. A. *Estudo do Comportamento Mecânico de uma Areia-Siltosa na Região de Bragança: Ensaio Triaxial*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção) – Instituto Politécnico de Bragança, Uni Evangélica, Bragança.
- PCIULLO, L. et. al. *A new look at the statistics of tailings dam failures*. Norway: Oslo – Nowergian Geotechnical Institute, 2022.
- PINTO, Carlos. S. *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- REID, David; FANNI, Riccardo. *A comparison of intact and reconstituted samples of a silt tailings*. Journal of Getotechnique, 2020.
- ROBERTSON, P. K. et. al. *Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão*. VALE: Painel de Especialistas, 2020.
- ROBERTSON, P. K. *Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied Strength using the CPT: an update*. Canadian Science Publishing, 2022. Disponível em: cpt-robertson.com/PublicationsPDF/Robertson CGJ 2022 Flow Liq.pdf. Acesso em: setembro de 2023.
- ROBSON, B. A. *Estimating the volume of the 1978 Rissa quick clay landslide in Central Norway using historical aerial imagery*. Open Geosciences: 2022.
- RODRIGUES, A. *Com risco de rompimento de barragem, moradores deixam suas casas em MG*. Agência Brasil, 2022. Disponível em: [Com risco de rompimento de barragem, moradores deixam suas casas em MG | Agência Brasil \(ebc.com.br\)](https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2023/09/com-risco-de-rompimento-de-barragem-moradores-deixam-suas-casas-em-mg). Acesso em: setembro de 2023.
- ROESER, M. Hubert; ROESER, A Patricia. *Quadrilátero Ferrífero - MG, Brasil: Aspectos Sobre sua História, seus Recursos Minerais e Problemas Ambientais Relacionados*. GEONOMOS, 2010.
- SILVA, J. P. S. et. al. *Behavioural analysis of iron ore tailings through critical state soil mechanics*. Soils and Rocks: An International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2022.

- SILVA, M. A. et. al. Impactos Ambientais causados em decorrência do rompimento da Barragem Camará no município de Alagoa Grande, PB. In: REVISTA DE BIOLOGIA E CIÊNCIAS DA TERRA. Vol. 6. N° 1. Paraíba: Universidade Estadual da Paraíba, 2006. p. 20-34.
- SKEMPTON, A. W. *The Pore-Pressure Coefficients A and B*. Geotechnique, vol. 4, p. 143-147, 1954.
- TERZAGHI, K.; PECK, R. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 2. ed. Nova York: Open Journal of Civil Engineering, 1967.
- TERZAGHI, K.; PECK, R.; MERISI, G. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3. ed. Canada: John Wiley and Sons, Inc., 1996.
- VICK, S. G. *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*. 1. ed. Vancouver: BiTech Publishers Ltd., 1990.
- VIEIRA, J. J. *Characterization of an Iron Ore Tailing Sample and the Evaluation of Its Representativeness*. Springer: Geotech. Geol. Eng., 2023.
- VILHETE, F. Didoney. *Retroanálise da Ruptura do Talude de Montante da Barragem Açú no Final do Período Construtivo*. 2017. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.