



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Caracterização experimental do comportamento não saturado de rejeitados mineiros

Catarina Rodrigues

Dissertação

Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Nuno Pereira Raposo
Professora Doutora Clarice Farian de Lemos

Novembro de 2022



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Caracterização experimental do comportamento não saturado de rejeitados mineiros

Catarina Rodrigues

Dissertação

Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor Nuno Pereira Raposo
Professora Doutora Clarice Farian de Lemos

Novembro de 2022



INSTITUTO POLITÉCNICO DE VISEU
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA E GESTÃO DE VISEU



CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO NÃO SATURADO DE REJEITADOS MINEIROS

CATARINA RODRIGUES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de MESTRE EM
ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO CONSTRUÇÃO E REABILITAÇÃO

Orientador: Professor Doutor Nuno Pereira Raposo

Coorientadora: Professora Doutora Clarice Farian de Lemos

WISEU
NOVEMBRO 2022

Dedico este trabalho a todos aqueles que não possuem acesso à educação e ao ensino de qualidade.

“Educação muda as pessoas. Pessoas transformam o mundo.”

Paulo Freire

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aqueles que de algum modo contribuíram com a minha jornada até aqui.

Aos meus pais, Marisa e Toninho, que me proporcionaram a oportunidade de vivenciar esta experiência. Pela força, pela compreensão e pelo carinho que sempre me prestaram ao longo de toda a minha vida acadêmica, bem como à elaboração da presente dissertação. Além de serem meus grandes incentivadores.

Aos meus irmãos, Laura e Murilo, que estão ao meu lado em todas as ocasiões, confiando no meu trabalho, pelo companheirismo, pela paciência e ajuda prestada. Também por serem fontes de inspiração, de incentivo e de coragem.

À minha família e aos meus amigos do Brasil pela compreensão da ausência e do afastamento. Em especial às minhas amigas, Lúcia, Ana, Sofia e Madu, e ao meu amigo, Cava, que, apesar da distância, sempre estiveram ao meu lado, dando suporte e motivação.

Aos amigos dos projetos acadêmicos da UTFPR-CT – da empresa júnior (Tetris), do centro acadêmico (CACAR), da associação acadêmica (Avalanche) – pelo carinho e pelos ensinamentos. Aos colegas, companheiros de graduação pelos conhecimentos compartilhados.

Aos amigos que fiz durante o programa de Dupla Diplomação em Portugal e estiveram comigo ao longo dessa jornada. Especialmente a Laura, o André e o Abner, pelo conforto e carinho, sendo minha família além-mar. Ao Bruno que é amigo presente mesmo na distância e um grande incentivador, além de colaborar a minha formação. E aos amigos, Eloisa, Alice e João, que fizeram parte da minha rotina de estudo, pela motivação e parceria, compartilhando planos e bons momentos.

Ao meu orientador, Professor Doutor Nuno Pereira Raposo, que me acompanhou dando auxílio, confiança e autonomia para a elaboração da pesquisa. À minha coorientadora, Professora Doutora Clarice Farian de Lemos, pela sua disponibilidade em me auxiliar no trabalho, além do apoio prestado durante todo o período do programa de Dupla Diplomação.

Agradeço também à Universidade Tecnológica Federal do Paraná por todo o aprendizado, dentro e fora de sala, e por proporcionar esta oportunidade de crescimento profissional e pessoal através do Programa de Dupla Diplomação. Ao Instituto Politécnico de Viseu por receber-me e permitir-me a utilização de toda a estrutura e docentes, onde pude crescer como pessoa e desfrutar da cultura local.

Àqueles que me ajudaram de forma direta ou indireta com o desenvolvimento desse projeto, tanto na pesquisa, como no suporte e no incentivo.

A todos, meu muito obrigada!

“If you can dream it, you can do it.”
Walt Disney

RESUMO

O setor da mineração representa uma das mais importantes atividades econômicas do mundo e apresenta relevância na engenharia civil. Os minerais empregados na construção são provenientes de diversos processos industriais que geram grande volume de resíduos, nomeados por rejeitos de mineração, durante seu beneficiamento.

Os rejeitados mineiros têm em sua composição partículas finas derivadas da rocha explorada e são pouco aproveitados devido ao alto teor de água e baixo teor de sólido. A baixa empregabilidade devido às suas propriedades e ao seu aspecto de lama torna-o um problema ambiental. Uma forma comumente utilizada para armazenamento é a criação de reservatórios de barragens ou diques de contenção, onde os rejeitos minerais são depositados em diversas camadas e degraus. No entanto, a deposição dos rejeitados, geralmente, ocorre em condições saturadas, podendo provocar graves efeitos de estabilidade da estrutura.

No presente trabalho procedeu-se ao estudo de caracterização do comportamento não saturado de três materiais: o primeiro trata-se de amostra de pó de pedra (PP), proveniente da moagem de pedra; o segundo e o terceiro correspondem a duas amostras de rejeitados mineiros (RJ1 e RJ2), subprodutos do beneficiamento mineral. O objetivo principal é obter o comportamento não saturado dos rejeitos relacionado à curva característica de retenção de água, por meio do método do papel filtro.

A curva característica de retenção de água representa a capacidade do solo em armazenar água, que é expressa em energia de sucção (kPa) e traduz a força de ligação entre as partículas de rejeitado e as moléculas de água. A metodologia do papel filtro foi escolhida, pois permite alcançar bons resultados com precisão relevante e grandes variações de sucção num curto prazo. Além disso, trata-se de uma alternativa simples e barata, podendo ser aplicada em laboratório ou em campo, que possibilita simular condições similares ao solo in situ. O papel filtro utilizado foi o W42 (Whatman nº42), que apresenta curva de calibração conhecida e normatizada pela ASTM D 5298-03.

Inicialmente, foi realizado a caracterização – densidade dos grãos, peneiração, sedimentação, análise granulométrica, limite de liquidez e limite de plasticidade – dos casos de estudo e então procedeu-se com o método do papel filtro. A técnica foi produzida utilizando 8 teores de umidade para PP e RJ1 e 9 teores de umidade para RJ2, como partida para o desenvolvimento dos provetes utilizando o modelo proposto por Marinho (2006) e Fredlund (2012).

A partir das simulações, as três amostras obtiveram características de silte, material que possui baixa ou nenhuma plasticidade, de granulometria fina e baixa resistência quando seco ao ar. O método do papel filtro mostrou-se satisfatório na determinação das curvas de retenção.

ABSTRACT

The mining sector represents one of the most important economic activities in the world and is relevant in civil engineering. The minerals used in construction come from various industrial processes that generate a large volume of waste, called mine tailings, during their processing.

Mine tailings have fine particles derived from the exploited rock in their composition and are little used due to their high water content and low solids content. The low employability due to its properties and its muddy appearance makes it an environmental problem. A commonly used form of storage is the creation of dam reservoirs or containment dikes, where mineral tailings are deposited in several layers and steps. However, the deposition of tailings generally occurs under saturated conditions, which can cause serious effects on the stability of the structure.

In the present work, the characterization of the unsaturated behavior of three materials was carried out: the first is a sample of stone dust (PP), from stone grinding; the second and third correspond to two samples of mine tailings (RJ1 and RJ2), by-products of mineral processing. The main objective is to obtain the soil water characteristic curve, through the filter paper method.

The soil water characteristic curve represents the soil's ability to store water, which is expressed in suction energy (kPa) and translates the binding force between the tailings particles and the water molecules. The filter paper methodology was chosen because it allows achieving good results with relevant precision and large suction variations in a short term. In addition, it is a simple and inexpensive alternative, which can be applied in the laboratory or in the field, which makes it possible to simulate conditions similar to soil in situ. The filter paper used was W42 (Whatman n°42), which has a known calibration curve standardized by ASTM D 5298-03.

Initially, the characterization - grain density, sieving, sedimentation, granulometric analysis, liquidity limit and plasticity limit - of the case studies was carried out and then proceeded with the filter paper method. The technique was produced using 8 moisture contents for PP and RJ1 and 9 moisture contents for RJ2, as a starting point for the development of specimens using the model proposed by Marinho (2006) and Fredlund (2012).

From the simulations, the three samples obtained characteristics of silt, a material that has low or no plasticity, fine granulometry and low resistance when dried in air. The filter paper method proved to be satisfactory in determining the retention curves.

PALAVRAS CHAVE

Rejeitos de mineração

Sucção

Curva característica

Curva de retenção

Não saturado

Papel filtro

KEY WORDS

Mining tailings
Suction
Soil Water Characteristic Curve
Retention curve
Unsaturated
Filter paper

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	vii
RESUMO	xi
ABSTRACT	xiii
ÍNDICE GERAL	xix
ÍNDICE DE FIGURAS	xxiii
ÍNDICE DE TABELAS	xxvi
ÍNDICE DE QUADROS	xxix
ÍNDICE DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xxxii
ÍNDICE DE SÍMBOLOS	xxxiii
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento do tema	1
1.2 Objetivo do trabalho	2
1.3 Estruturação do trabalho	2
1.4 Justificativa da pesquisa.....	3
2. Estado da arte.....	4
2.1 Mineração	4
2.2 Rejeitos de mineração	5
2.2.1 Deposição de rejeitos de mineração	6
2.2.2 Espessamento de rejeitos de mineração.....	7
2.3 Barragens com deposição de rejeitos de mineração	8
2.3.1 Método de montante	8
2.3.2 Método de jusante.....	9
2.3.3 Método de linha de centro	10
2.4 Caracterização dos rejeitos de mineração	10
2.4.1 Densidade de partículas sólidas	11
2.4.2 Teor de umidade	14
2.4.3 Análise granulométrica.....	14

2.4.4	Limites de Atterberg	26
2.4.5	Curva de retração	30
2.4.6	Classificação dos solos.....	32
2.5	Água nos rejeitos de mineração.....	34
2.5.1	Sucção	34
2.5.2	Curva de retenção.....	35
2.5.3	Ajuste da curva de retenção	40
2.6	Método do papel filtro.....	41
2.6.1	Contexto histórico	41
2.6.2	Fundamentos do papel filtro	41
2.6.3	Funcionamento do papel filtro	42
2.6.4	Curvas de calibração do papel filtro	43
3.	Metodologia	47
3.1	Introdução.....	47
3.2	Ensaio de densidade de partículas sólidas.....	48
3.3	Ensaio de granulometria.....	50
3.3.1	Ensaio de peneiração.....	50
3.3.2	Ensaio de sedimentação	52
3.3.3	Curva granulométrica.....	55
3.4	Ensaio de limites de consistência	56
3.4.1	Ensaio de limite de liquidez	56
3.4.2	Ensaio de limite de plasticidade.....	58
3.5	Ensaio do papel-filtro	59
3.6	Calibração da curva de retenção.....	64
4.	Resultados e discussões	66
4.1	Considerações iniciais	66
4.2	Pó de pedra	66
4.2.1	Caracterização do pó de pedra	66
4.2.2	Curva de retenção de água do pó de pedra.....	69
4.3	Rejeitos de mineração 1	71
4.3.1	Caracterização dos rejeitos de mineração 1	71
4.3.2	Curva de retenção de água dos rejeitos de mineração 1	75

4.4	Rejeitos de mineração 2.....	77
4.4.1	Caracterização dos rejeitos de mineração 2.....	77
4.4.2	Curva de retenção de água dos rejeitos de mineração 2.....	81
4.5	Discussões.....	83
4.5.1	Caracterização dos materiais	83
4.5.2	Modelo de retração	85
4.5.3	Papel filtro	86
4.5.4	Curva característica de retenção de água.....	87
5.	Conclusões.....	90
5.1	Conclusões gerais	90
5.2	Sugestões de trabalhos futuros.....	92
	Referências	93
	Anexo A – Densidade das partículas segundo a NORMA CEN ISO/TS 17892-3:2004	98
	Anexo B – Análise granulométrica segundo a NORMA CEN ISO/TS 17892-4:2004.....	100
	Anexo C – Limites de Atterberg segundo a NORMA PORTUGUESA NP-143:1969.....	106
	Anexo D – Papel filtro segundo a NORMA AMERICANA ASTM D5298:2003	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Processo de exploração do minério bruto.....	5
Figura 2-2: Quantidade de partículas sólidas ao longo do espessamento.....	7
Figura 2-3: Método montante.....	9
Figura 2-4: Método jusante.....	9
Figura 2-5: Método linha de centro.....	10
Figura 2-6: Determinação do volume dos sólidos pelo peso de água deslocada.....	11
Figura 2-7: Ensaio de peneiração.....	16
Figura 2-8: Etapas do ensaio de sedimentação descontínua e curva típica.....	17
Figura 2-9: Densímetro de vidro.....	18
Figura 2-10: Correção da leitura do menisco.....	19
Figura 2-11: Leitura do densímetro.....	20
Figura 2-12: Correção do cilindro graduado de sedimentação.....	21
Figura 2-13: Leitura da pipeta.....	24
Figura 2-14: Curva característica de distribuição granulométrica.....	26
Figura 2-15: Estados de consistência.....	27
Figura 2-16: Definição dos limites de Atterberg.....	28
Figura 2-17: Aparelho Casagrande.....	28
Figura 2-18: Ensaio de limite de plasticidade.....	29
Figura 2-19: Curva de retração típica.....	31
Figura 2-20: Cápsula de contração.....	32
Figura 2-21: Determinação do volume da pastilha seca.....	32
Figura 2-22: Carta de plasticidade de Casagrande.....	33
Figura 2-23: Curvas de secagem e de umedecimento e o estado inicial do solo em campo....	37
Figura 2-24: Câmara de pressão de Richards.....	39
Figura 2-25: Psicômetro WP4-T.....	39
Figura 2-26: Curva de retenção de água típica um solo.....	40
Figura 2-27: Tipos de fluxo entre o material e o papel filtro.....	42
Figura 2-28: Curvas de calibração para o papel filtro W42.....	45
Figura 3-1: PP.....	48
Figura 3-2: RJ1.....	48
Figura 3-3: RJ2.....	48
Figura 3-4: Densidade dos grãos com o material RJ2.....	48
Figura 3-5: Provetes submetidos a bomba de vácuo.....	49
Figura 3-6: Aferição da massa do picnômetro com material PP.....	49
Figura 3-7: Agitador mecânico.....	51
Figura 3-8: Equipamento Riffing ou esartejamento.....	51
Figura 3-9: Materiais utilizados para o ensaio de sedimentação.....	52

Figura 3-10: Aparelho dispersor automático	52
Figura 3-11: Aferição de densidade e temperatura da amostra PP	53
Figura 3-12: Sedimentação em menos de 24 horas com RJ1 e RJ2	54
Figura 3-13: Sedimentação após 24 horas com RJ1 e RJ2	54
Figura 3-14: Sedimentação após 48 horas com RJ1 e RJ2	55
Figura 3-15: Distribuição de tamanho de partícula.....	56
Figura 3-16: Preenchimento da concha de Casagrande com o material RJ1	57
Figura 3-17: Ranhura no centro da concha sobre a pasta de RJ1	57
Figura 3-18: Rolamento da amostra RJ2 sobre a superfície de vidro	58
Figura 3-19: Retalhos da amostra de RJ2 sobre a placa de vidro	58
Figura 3-20: Filamento de RJ2.....	59
Figura 3-21: Materiais utilizados para a montagem dos provetes	60
Figura 3-22: Amostra de PP umedecidas	60
Figura 3-23: Amostras de RJ1 e RJ2 umedecidos	60
Figura 3-24: Provetes de RJ2 armazenados	62
Figura 3-25: Amostras úmidas	62
Figura 3-26: Aferição das massas em balança de ultra-precisão	62
Figura 3-27: Secagem das amostras em estufa controlada	63
Figura 3-28: Amostras após período de sucção e correspondente papel filtro	63
Figura 3-29: Amostras de RJ2 no dessecador	63
Figura 3-30: Calibração de curvas de sucção para umedecimento de papel filtro.....	64
Figura 4-1: Curva granulométrica do pó de pedra	68
Figura 4-2: Curva de retenção de água para o pó de pedra.....	71
Figura 4-3: Curva granulométrica do rejeito de mineração 1	73
Figura 4-4: Diagrama de consistência de RJ1	74
Figura 4-5: Curva de retenção de água para o rejeito de mineração 1	77
Figura 4-6: Curva granulométrica do rejeito de mineração 2	79
Figura 4-7: Diagrama de consistência de RJ2.....	80
Figura 4-8: Curva de retenção de água para o rejeito de mineração 2.....	83
Figura 4-9: Curva granulométrica.....	84
Figura 4-10: Retração de RJ1 durante secagem em estufa a 105 °C.....	85
Figura 4-11: Retração de RJ2 durante secagem em estufa a 105 °C.....	85
Figura 4-12: Papel filtro após ensaio de sucção.....	87
Figura 4-13: Papel filtro de rejeitos de mineração com marcas de oxidação	87
Figura 4-14: Proвете de RJ2 e papéis filtro secos	87
Figura 4-15: Curva de retenção de água	88

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1: Plasticidade dos solos	33
Tabela 2-2: Consistência dos solos	34
Tabela 2-3: Concentrações de solução salina para avaliação da sucção do solo	44
Tabela 2-4: Curvas de calibração para papel filtro	46
Tabela 3-1: Detalhamento de amostras e idades para o ensaio do papel filtro	61
Tabela 4-1: Caracterização do material pó de pedra	69
Tabela 4-2: Caracterização do material rejeito de mineração 1	75
Tabela 4-3: Caracterização do material rejeito de mineração 2	81

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2-1: Densidade de água retirada em várias temperaturas	13
Quadro 2-2: Viscosidade dinâmica da água	22
Quadro 2-3: Correção de temperatura para a leitura do densímetro.....	23
Quadro 2-4: Profundidade de inserção da pipeta.....	25
Quadro 3-1: Massa mínima necessária para peneiramento em função da partícula D90.....	50
Quadro 3-2: Massa seca do corpo de prova de solo para teste de sedimentação	53
Quadro 4-1: Densidade dos grãos de PP	67
Quadro 4-2: Sedimentação do pó de pedra.....	67
Quadro 4-3: Dados de umidade e sucção para o PP por meio do papel filtro	70
Quadro 4-4: Densidade dos grãos de RJ1	72
Quadro 4-5: Sedimentação do rejeito de mineração 1	72
Quadro 4-6: Limites de Atterberg para RJ1	74
Quadro 4-7: Dados de umidade e sucção para RJ1 por meio do papel filtro	76
Quadro 4-8: Densidade dos grãos de RJ2.....	78
Quadro 4-9: Sedimentação do rejeito de mineração 2.....	78
Quadro 4-10: Limites de Atterberg para RJ2	80
Quadro 4-11: Dados de umidade e sucção para RJ2 por meio do papel filtro	82

ÍNDICE DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MG	Minas Gerais
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
CEN	Comitê Europeu de Normalização
TS	<i>Technical Specification</i>
EN	Norma Europeia
NP	Norma Portuguesa
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
NBR	Norma Técnica Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
LR	Limite de retração
I _P	Índice de plasticidade
I _C	Índice de consistência
I _L	Índice de liquidez
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
SWCC	<i>Soil Water Characteristic Curve</i>
ENR	<i>Extended Non – Linear Regression</i>
WP4	<i>Dewpoint Potential Meter</i>
W42	Whatman nº42
D ₉₀	Diâmetro equivalente a 90% ou mais da amostra passante

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

m	Massa
ρ	Densidade específica
G	Densidade dos grãos
μ	Viscosidade
v	Velocidade
D	Diâmetro
H_r	Profundidade efetiva
CT	Correção de temperatura
η	Viscosidade dinâmica
d	Diâmetro equivalente
t	Tempo
V	Volume
w	Teor em água gravimétrico
θ	Teor em água volumétrico
ψ_m	Potencial matricial
ψ	Sucção
R	Constante universal do gás ideal
T	Temperatura
mg	Miligrama
g	Grama
μm	Micrômetro
mm	Milímetro
cm	Centímetro
m	Metro
ml	Mililitro
l	Litro
s	Segundo
min	Minuto
h	Hora
%	Porcentagem
°C	Grau Celsius
kPa	Quilo Pascal
K	Grau Kelvin
mol	Mol

1. Introdução

1.1 Enquadramento do tema

O setor da mineração representa uma das mais importantes atividades econômicas do mundo por estar presente em quase tudo o que consumimos atualmente, seja na produção ou nos produtos indispensáveis no cotidiano das pessoas. No entanto, os minerais destacam-se por viabilizar materiais muito utilizados na construção civil.

Os minerais empregados na engenharia civil são provenientes de diversos processos industriais, físicos ou químicos, tendo como base a pesquisa local, extração, transporte, processamento, transformação e comercialização do produto obtido. Durante sua extração e seu beneficiamento são gerados subprodutos, chamados de rejeitos de mineração ou rejeitos de minérios, compostos por partículas finas derivadas da rocha explorada e que não são aproveitados devido ao alto teor de água e baixo teor de sólido. Desse modo, a suspensão das pequenas partículas em água apresenta aspecto de lama.

O baixo aproveitamento desse material devido às suas propriedades é um problema ambiental, tendo em vista que seu descarte deve ser realizado respeitando muitas regulamentações. Ainda que apresentem menor qualidade e interesse comercial, uma forma comum de armazenamento da lama é a criação de reservatórios de barragens ou diques de contenção, onde os rejeitos de mineração são depositados em diversas camadas e degraus, dando aspecto e forma ao reservatório. Assim como o descarte deve seguir normas ambientais, a utilização do subproduto explorado para a composição da barragem carece de atenção às normas de construção, de segurança e de manutenção da estrutura.

O monitoramento das barragens de rejeitos deve ser realizado constantemente, de modo que comprove a estabilidade da estrutura devido ao excesso de fluidez do material. Apesar de existir

pessoal técnico para garantir a segurança, acidentes devido ao colapso de barragens são frequentes, como os casos ocorridos em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), em Minas Gerais no Brasil.

Atualmente, existem diversas políticas e incentivos, no Brasil e em Portugal, que buscam diagnosticar, prevenir, preservar e minimizar os diversos efeitos prejudiciais que os reservatórios podem receber. Neste contexto, utilizou-se de três amostras de materiais, sendo uma de pó de pedra de granito branco e duas de rejeitos de mineração provenientes de minas de exploração de cobre e zinco, para a caracterização dos materiais no estado não saturado, utilizando o método do papel filtro. Esta dissertação consistiu em determinar a curva característica de retenção de água dos três materiais que são comumente empregados em estruturas de barragens que possuem grande impacto ambiental, político e social.

1.2 Objetivo do trabalho

Esse trabalho tem como principal objetivo realizar a caracterização de uma amostra de pó de pedra e duas amostras de rejeitos de minérios, através de ensaios laboratoriais, a fim de compreender o comportamento no estado não saturado e obter a curva característica de retenção de água dos materiais utilizando o método do papel filtro.

Visando alcançar o objetivo principal, os objetivos específicos traçados são:

- Caracterização dos materiais;
- Determinação da curva de retenção de água dos rejeitos de mineração;
- Definição das equações matemáticas que melhor ajustam os resultados experimentais obtidos.

1.3 Estruturação do trabalho

Este trabalho está seccionado em cinco grandes capítulos:

Capítulo 1 – Introdução

No primeiro e presente capítulo 1 é feita a apresentação do tema e as premissas necessárias para o desenvolvimento da pesquisa.

Capítulo 2 – Estado da arte

O capítulo 2 explicita a teoria que define o desenvolvimento do trabalho, de modo que tenha embasamento teórico e científico para a realização da caracterização do material de estudo.

Capítulo 3 – Metodologia

Em seguida, no capítulo 3, são apresentados os ensaios realizados detalhadamente, bem como a metodologia e os mecanismos aplicados para a determinação das curvas e parâmetros que se referem ao comportamento das amostras.

Capítulo 4 – Resultados e discussões

O capítulo 4 refere-se aos dados obtidos e aos resultados encontrados por meio dos ensaios e análises das simulações realizadas.

Capítulo 5 – Conclusões

Por fim, apresenta-se o quinto e último grupo, capítulo 5, o qual valida a pesquisa e os questionamentos levantados no início da dissertação, trazendo as conclusões do objeto de estudo. Além de pontuar considerações que podem direcionar trabalhos futuros.

1.4 Justificativa da pesquisa

A deposição de rejeitos de mineração é, na grande maioria dos casos, realizada em condições saturadas. Apesar disso, a exposição ambiental bem como a geometria dos depósitos de rejeitos de mineração leva, em muitos casos, a uma dessaturação parcial dos rejeitados, provocando, então, que as tensões matriciais passem a ter um papel fundamental no comportamento desses materiais. Tendo por base essa problemática, pretende-se com esta dissertação caracterizar o comportamento não saturado de rejeitos de mineração, em especial nos aspectos relacionados à curva característica de retenção de água. Este estudo permitirá contribuir para uma melhor compreensão do comportamento dos rejeitos de mineração não-saturados e para uma adequação das técnicas laboratoriais a empregar na sua caracterização.

2. Estado da arte

2.1 Mineração

“As partículas sólidas que compõem as rochas e os solos são os minerais. Um mineral é uma substância inorgânica e natural, com composição química e estrutura definidas. A designação de minério é atribuída a um mineral de valor econômico.” [1]

O minério é toda rocha constituída de um ou mais minerais valiosos que podem ser aproveitados como bens úteis [2]. Este mesmo material é encontrado na natureza em sua forma rochosa como matéria-prima e deve ser tratado para atender às necessidades, visando funcionalidade e aplicação. O conjunto de operações de melhoria de minerais denomina-se tratamento ou beneficiamento e tem por objetivo o refinamento e a comercialização do produto. Estes processos são apresentados na Figura 2-1.

Ao final das várias etapas de melhoria, obtém-se dois materiais: o concentrado e o rejeitado. O primeiro equivale ao produto com alta quantidade de minério e elevado valor agregado, sendo ideal para comercialização. O segundo, no entanto, corresponde ao subproduto que apresenta quantidades inferiores de minério, podendo ser próximas a zero, quando bem executado o beneficiamento; e, conseqüentemente, possui pouco interesse econômico e grande preocupação ambiental.

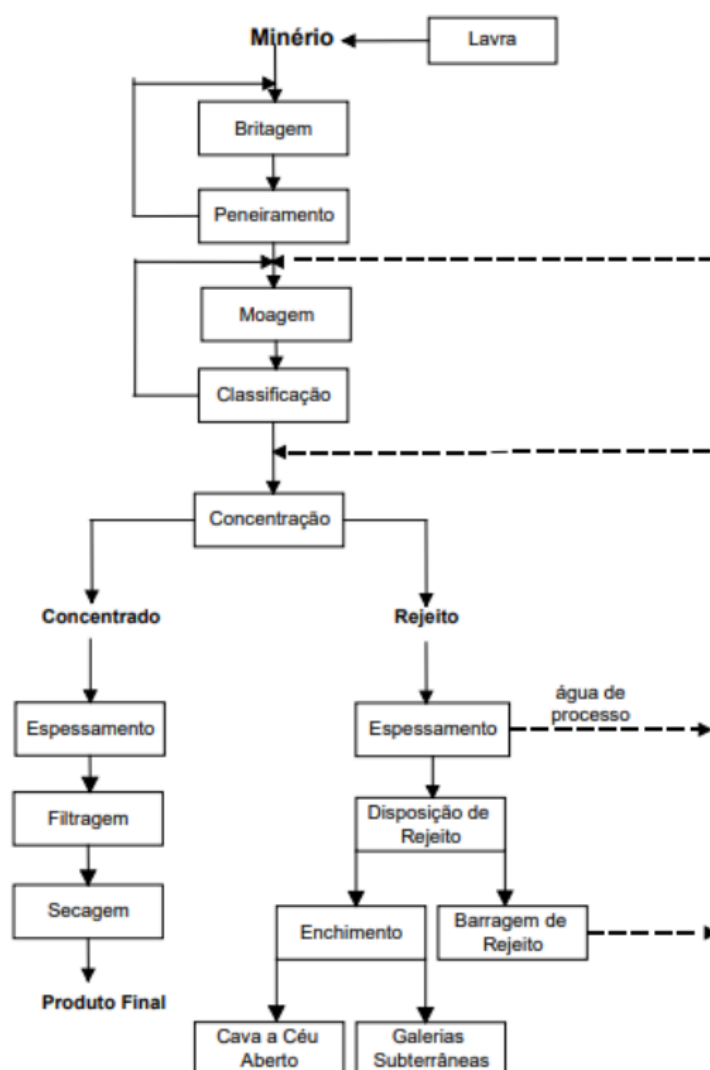


Figura 2-1: Processo de exploração do minério bruto
Fonte: [2]

2.2 Rejeitos de mineração

Os rejeitos de mineração, por definição, são compostos por quaisquer materiais gerados como subproduto e descarte durante o beneficiamento de minérios [3]. Provenientes de processos que, em sua maioria, necessitam de grande escala de água. Devido a esta elevada quantidade de umidade presente ao longo das etapas de britagem, moagem e tratamento químico, o produto final tem aparência de lama com partículas sólidas de rejeitados.

Também, em razão do pouco aproveitamento econômico que o material apresenta, por conta da baixa quantidade de minérios, há um grande acúmulo de substância para descarte e pouca empregabilidade.

2.2.1 Deposição de rejeitos de mineração

Os rejeitados de minério, que possuem elevado grau de degradação ambiental, devem ser armazenados de forma planejada e organizada a fim de minimizar os riscos estruturais e ambientais. A essa ação dá-se o nome de disposição de rejeito [3]. A deposição dos rejeitos tem influência do teor de água em suas partículas e pode ser realizada de forma subterrânea ou a céu aberto.

Como citado no item 2.2, os rejeitos são partículas sólidas resultantes do beneficiamento do minério e sua granulometria varia de acordo com a origem e função do mineral. Além disso, cerca de 70% do material é composto por água. Tal característica permite o manuseio e transporte utilizando tubulações por meio da gravidade ou por bombeamento [4]. O que facilita a manipulação dos rejeitos de mineração através de tubulações é a proximidade com o local de deposição do composto – rejeitos de mineração e água.

Habitualmente, os diques de contenção estão alocados em bacias ou vales próximos aos sítios de mineração. A deposição mais usual é a céu aberto, e pode ser feita em pilhas controladas ou em estruturas de contenção [4].

No entanto, a melhor forma de deposição dos rejeitados deve atender às necessidades características do subproduto, considerando o tipo de rejeitado, o grau de espessamento, a área disponível e entre outros [5]. Dentre as possibilidades de deposição dos rejeitados, as metodologias mais comuns são: deposição convencional e deposição subterrânea (*backfill*).

A primeira e mais conservadora deposição é a convencional, a qual é realizada sem o tratamento da lama proveniente da mineração, ou seja, sem que haja o espessamento do rejeitado. A deposição convencional pode ser realizada de duas formas: subaérea e subaquática. O modelo de subaéreo corresponde ao lançamento dos rejeitos de mineração sobre o terreno natural ou alteado rejeitos sobre os já depositados [5].

O modelo de deposição subaquático, apesar de comum, não é muito utilizado devido aos impactos ambientais negativos em relação aos ecossistemas aquáticos. Este modelo promove a segregação dos rejeitos em decorrência da fluidez com que o material é lançado e o meio em que se insere. Além disso, deve-se atentar à velocidade de deposição das partículas. A metodologia é indicada para rejeitos passíveis de oxidação (sulforetos), pois quando submersos, possuem acesso limitado ao oxigênio [5].

A deposição subterrânea é praticada preenchendo as cavas criadas durante a extração do minério com o próprio subproduto do material retirado. Os rejeitos são bombeados de modo que ocupem o espaço subterrâneo disponível. Também, é habitual acrescentar aditivos do tipo ligantes hidráulicos à pasta (*paste backfill*), em pequena quantidade, para incrementar as propriedades mecânicas [6]. O processo de deposição subterrânea é favorável por ocupar um espaço que antes já era preenchido por minérios, permitindo a redução de custos. Todavia, nota-se que o volume dos rejeitos de mineração é superior ao volume ocupado pela rocha bruta

previamente, provocado pela expansão da rocha envolvente. Assim faz-se necessário a deposição do material na superfície, ainda que em menor volume [5].

Frequentemente, utilizam-se de barragens para a deposição de rejeitos de mineração. No entanto, observam-se poucas alternativas construtivas em relação às barragens tradicionais, principalmente tratando-se da viabilidade técnico-econômica, sendo mais atrativa a utilização de aterros hidráulicos para o armazenamento do subproduto, devido seu aspecto de lama [7]. Outra opção para aplicação dos rejeitos é realizar o reprocessamento do material, a fim de torná-lo economicamente mais interessante.

2.2.2 Espessamento de rejeitos de mineração

Antes de destinar o material às barragens, comumente utilizadas como depósitos, com o intuito de reduzir o volume e facilitar o transporte, realizam-se processos que permitem a remoção de parte da água presente na lama e, conseqüentemente, obtêm-se um subproduto de maior concentração, melhores propriedades e estabilidade [8]. O processamento da lama proveniente da mineração para a remoção da água denomina-se espessamento (Figura 2-2) [3].

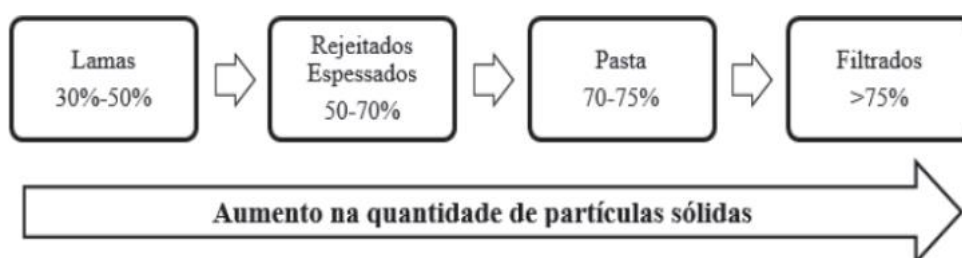


Figura 2-2: Quantidade de partículas sólidas ao longo do espessamento
Fonte: [9]

Além de favorecer o armazenamento e a melhoria das propriedades dos rejeitos, o espessamento é realizado como alternativa de aproveitamento e de reuso da água, o qual é uma atividade importante para locais onde há escassez de recursos hídricos e restrições ambientais [8].

O objetivo desta operação é a separação sólido-líquido, realizada por meio da sedimentação decorrente da ação da gravidade e causada pela diferença entre as densidades dos materiais constituintes [7]. Dois tipos de equipamentos são usados para essa atividade: os espessadores e os clarificadores. O primeiro tem como interesse a obtenção do material com alta concentração de sólidos, já o segundo tem como propósito a produção do material líquido e baixa concentração de sólidos [10].

Para a aplicação dos rejeitos de mineração em barragens, busca-se o material espessado, que pode ser obtido por meio da operação de sedimentação. Esta operação tem como base o transporte das partículas sólidas suspensas sob ação das forças da gravidade, o empuxo e a inércia [10].

2.3 Barragens com deposição de rejeitos de mineração

A quantidade de rejeitos gerada nos processos de beneficiamento de minério é alta, por consequência, recorre-se às barragens com rejeitos de mineração. Estas barragens são grandes estruturas construídas de forma a reter e acumular o subproduto dos minérios, além de permitir o armazenamento de água formando um grande reservatório [11].

Não obstante, verifica-se que o volume depositado em barragens cresce aproximadamente 10 vezes e a área de armazenamento desse rejeito de mineração aumenta cerca de 5 vezes, a cada 3 décadas. Tornando-se uma preocupação devido ao acúmulo do material ocupar grandes dimensões, além das inseguranças e danos que a extensa barragem pode proporcionar [2].

Dessa forma, os barramentos no Brasil são classificados considerando os critérios de categoria de risco e dano potencial associado, atentando-se às características técnicas, estado de conservação, condições de segurança e potencial de dano [13].

Em geral, o procedimento inicial para a construção do dique se dá por meio do entulho gerado pela exploração mineira e empréstimo de solo local que apresente capacidade de retenção dos rejeitos. O desenvolvimento da estrutura, em sequência, ocorre por meio do alteamento que corresponde ao incremento de altura do maciço de forma controlada para que haja aumento da capacidade de armazenamento do tanque destinado à contenção de rejeitos, sedimentos ou água [3].

O planejamento da construção da barragem é realizado em etapas de acordo com o local de disponível para a deposição do material. Além disso, a estrutura do reservatório pode adotar diversas configurações, cada qual com suas características técnicas. Existem três métodos mais utilizados para o alteamento e, por fim, a concepção do dique, sendo eles o método de montante, o método de jusante e o método de linha de centro [14].

2.3.1 Método de montante

Inicialmente, é necessária a construção de um dique de partida utilizando um material de aspecto grosso do tipo enrocamento compactado [15]. Em seguida, o corpo da barragem é desenvolvido por sucessivos alteamentos de rejeitados que são lançados sobre a estrutura no sentido contrário ao fluxo de água – a montante [16]. O modelo é representado na Figura 2-3.

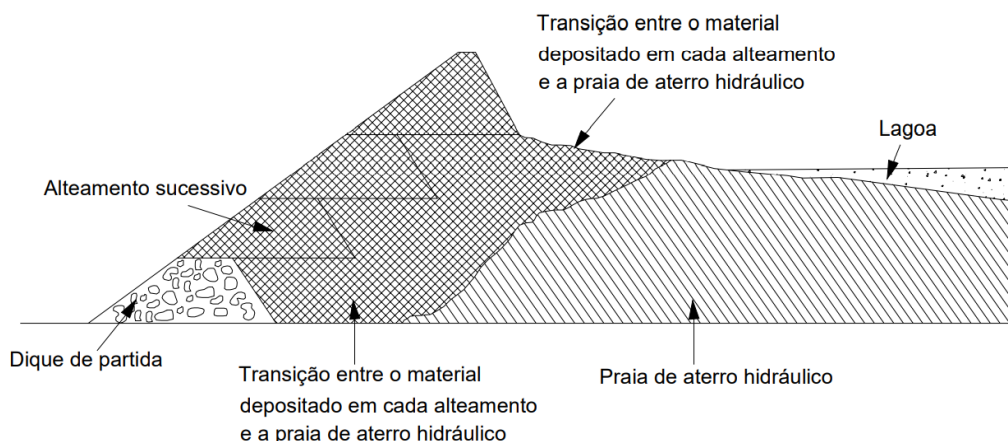


Figura 2-3: Método montante
Fonte: Adaptado de [7]

O método de montante é o mais econômico e mais utilizado pelas empreiteiras, as principais vantagens deste modelo são a maior velocidade de alteamento, facilidade de operação, utilização de menor volume de material e a possibilidade de execução em regiões de topografia muito íngremes [4]. Em contrapartida, a estrutura é sujeita à liquefação devido às sucessivas deposições, dificuldade de execução de um sistema de drenagem eficiente, limitação na altura do maciço e, conseqüentemente, baixa segurança [15].

2.3.2 Método de jusante

O método de jusante ou convencional é realizado em cima de um solo compactado, independentemente do material utilizado no dique de partida. Depois, é realizado sucessivos alteamentos no sentido do fluxo de água – a jusante – que constitui o corpo da barragem [16]. A Figura 2-4 demonstra o modelo configurado.

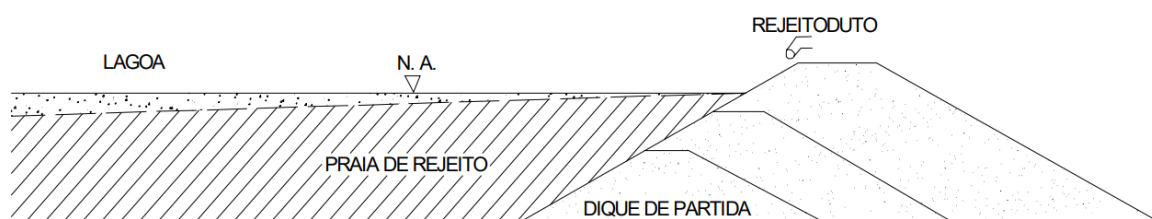


Figura 2-4: Método jusante
Fonte: Adaptado de [7]

A principal vantagem que compõe esta metodologia é a obtenção de uma estrutura mais sólida e estável, possibilitando a execução de um barramento de maior porte e mais seguro [15]. Além disso, pode ser aplicado em locais onde há vibrações ou sismicidade, facilidade na construção de sistema de drenagem contínuo e a viabilidade de compactação do material que é lançado [4]. Por outro lado, a estrutura de maior porte e melhores condições de segurança necessita de mais material para sua construção, por conseguinte, apresenta custo mais elevado de execução. Também, devido ao tamanho do barramento, carece da confecção de um alto dique, de forma que a crista do maciço esteja acima do nível do reservatório [7].

2.3.3 Método de linha de centro

O terceiro e último modelo oscila entre os dois métodos anteriores – métodos de montante e de jusante. O incremento do maciço sobre o dique de partida é realizado de modo que a linha central da crista do barramento não se mova horizontalmente em direção a montante, com o alteamento apoiado sobre os rejeitos, e a jusante, com lançamento sobre a fundação do terreno ou do material previamente compactado [15]. Dessa forma, o cume do reservatório é mantido desde o início de sua construção. O modelo é exemplificado por meio da Figura 2-5.

A solução trata-se de uma combinação entre dois métodos, configurada por uma geometria intermediária. Mesmo assim, seu comportamento estrutural tende às características do método de jusante [7].

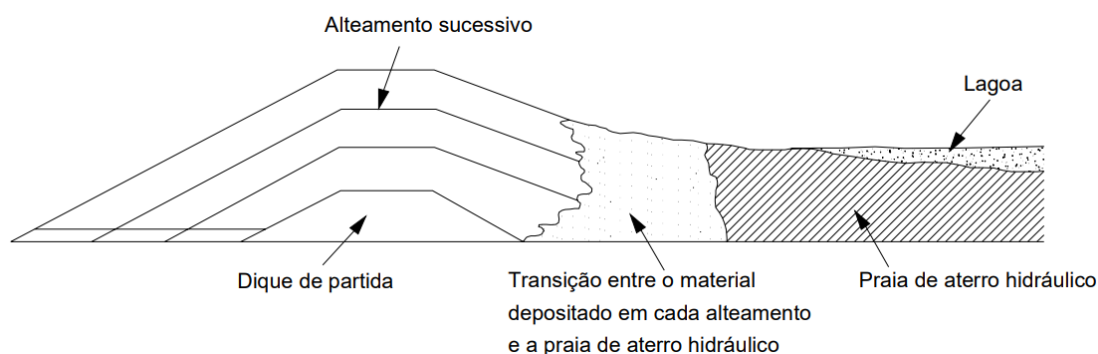


Figura 2-5: Método linha de centro

Fonte: Adaptado de [7]

Assim como as características técnicas do modelo oscila entre os dois métodos, as vantagens e desvantagens são alternadas também. As vantagens que a técnica carrega são a facilidade de construção, eixo de alteamento constante e redução do volume de material empregado em relação ao método de jusante. Em compensação, o modelo carece de sistemas de drenagem eficientes e sistemas de contenção de material a jusante, a construção da estrutura é mais complexa e, portanto, exige maiores investimentos [4].

2.4 Caracterização dos rejeitos de mineração

É evidente a importância de realizar um projeto de barragem de rejeitos de mineração seguro, econômico e funcional. A escolha correta do método de disposição do material deve ser feita com base nas características físicas, químicas e geotécnicas do rejeito de mineração. As etapas construtivas do projeto são justificadas pelas propriedades como granulometria, resistência ao cisalhamento, permeabilidade e sedimentação.

A fim de garantir o bom desempenho da estrutura, existe a necessidade de conhecer o máximo potencial de utilização do material. Dessa forma, a caracterização dos rejeitos de minério é feita por um conjunto de técnicas para determinar as propriedades físicas e mecânicas de uma amostra do subproduto da mineração.

2.4.1 Densidade de partículas sólidas

O solo é constituído por um conjunto de partículas sólidas que podem apresentar vazios entre si preenchidos – parcialmente, totalmente ou não – por água. Seu comportamento é influenciado diretamente por suas propriedades mineralógicas e pela proporção entre as fases (sólidos, água e ar) [17]. Contudo, tratando-se de rejeitos de mineração, material proveniente de diversas regiões e jazigos de exploração com diferentes propriedades, constatou-se que a determinação dessa grandeza apresenta grande variabilidade [5]. Neste caso, existe a necessidade de definir a característica para cada situação de estudo, possibilitando maior credibilidade dos resultados.

A densidade de partículas sólidas é definida pela relação entre a massa das partículas e o seu volume. Segundo Amorim [7], as condições de estabilidade do maciço estrutural tanto sob os parâmetros da estática quanto da dinâmica são favorecidas quando o material utilizado apresenta elevada densidade.

O procedimento de determinação pode ser realizado em laboratório com o auxílio de um picnômetro. O método é baseado na determinação do volume de uma massa conhecida de solo pelo fluido deslocado. A densidade das partículas sólidas é calculada a partir da massa do solo e do volume. A metodologia é definida pela norma internacional CEN ISO/TS 17892-3 (2004) e se aplica a tipos de solo com tamanhos de partícula abaixo de 4 mm [18]. O ensaio é ilustrado pela Figura 2-6.

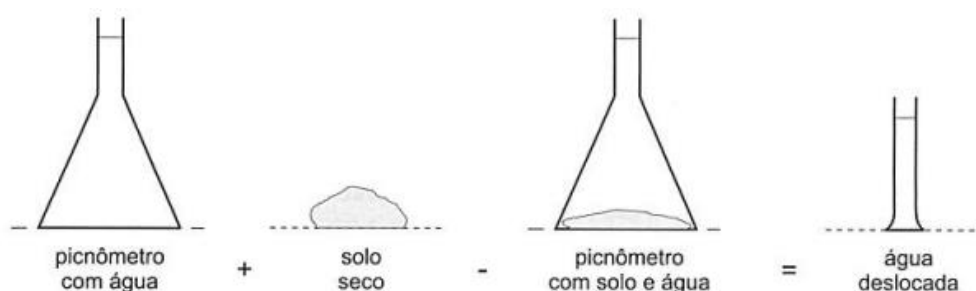


Figura 2-6: Determinação do volume dos sólidos pelo peso de água deslocada
Fonte: [17]

Primeiramente, registra-se a massa do picnômetro seco. Então, adiciona-se água ao equipamento e anota-se a massa de calibração. Em seguida, coloca-se no picnômetro a amostra seca de estudo, complementa-se com água e obtém-se a massa total com a amostra [17]. A massa da água que foi preenchida pelo solo é obtida pela Equação 2-1.

$$m_4 = m_2 - m_0 \quad (2-1)$$

Onde,

m_0 = massa seca do picnômetro (g);

m_2 = massa seca do conjunto amostra e picnômetro (g);

m_4 = massa seca da amostra (g).

A densidade específica da água é conhecida, permitindo encontrar o volume da água deslocado que corresponde ao volume da amostra. Por fim, obtém-se a densidade específica das partículas sólidas, com a massa e o volume que foram determinados anteriormente (Equação 2-2).

$$\rho_s = \frac{m_4}{(m_1 - m_0) - (m_3 - m_2)} \times \rho_w \quad (2-2)$$

Onde,

m_1 = massa do conjunto água e picnômetro (g);

m_3 = massa do conjunto amostra, água e picnômetro (g);

ρ_w = densidade da água (g/cm³);

ρ_s = densidade das partículas da amostra (g/cm³).

Nos casos em que a temperatura do conjunto água-picnômetro se diferencia da temperatura do conjunto amostra-água-picnômetro, faz-se necessária a correção que é determinada pela Equação 2-3.

$$\rho_s = \frac{m_4}{\frac{(m_1 - m_0)}{\rho_{w;1}} - \frac{(m_3 - m_2)}{\rho_{w;3}}} \quad (2-3)$$

Onde,

$\rho_{w;1}$ = densidade da água quando determinado m_1 (g/cm³);

$\rho_{w;3}$ = densidade da água quando determinado m_3 (g/cm³).

A densidade da água para variadas temperaturas de ensaio é definida utilizando o Quadro 2-1.

Quadro 2-1: Densidade de água retirada em várias temperaturas

Temperatura	Densidade
T (°C)	ρ_w (mg/m ³)
10	0,99973
11	0,99963
12	0,99953
13	0,99941
14	0,99927
15	0,99913
16	0,99897
17	0,99889
18	0,99862
19	0,99843
20	0,99823
21	0,99802
22	0,99780
23	0,99757
24	0,99733
25	0,99708
26	0,99681
27	0,99654
28	0,99626
29	0,99598
30	0,99568

Fonte: Adaptado de [18]

A densidade dos grãos indica a relação entre a massa específica das partículas sólidas e a massa específica da água, assim sendo uma grandeza adimensional [19]. A relação é obtida através da Equação 2-4.

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (2-4)$$

Onde,

ρ_s = densidade específica da amostra (g/cm³);

ρ_w = densidade específica da água (g/cm³);

G_s = densidade dos grãos.

2.4.2 Teor de umidade

O teor de umidade é um indicador da quantidade de água presente num dado material [20]. A determinação do teor de umidade deve ser realizada para os ensaios, tratando-se de um estudo da influência da água presente nos rejeitos de mineração. Dessa forma, o procedimento seguiu a norma NP EN ISO 17892-1 (2014) [21].

O ensaio consiste em separar uma amostra e secá-la em estufa de temperatura controlada. Para isso, utilizam-se cápsulas metálicas, uma balança de ultra precisão com aproximação de 0,0001 g, estufa de secagem e os materiais de pesquisa.

Inicialmente, coleta-se a massa da cápsula metálica vazia e limpa, preenche-a com o material de estudo no estado úmido e anota-se a massa com conjunto. Em seguida, leva-se à estufa, regulada a temperatura de 105 °C, o material para secagem. Quando o conjunto apresentar massa constante, correspondente ao material seco, verifica-se a massa do conjunto (cápsula metálica e amostra no estado seco).

O teor de água do rejeitado mineiro é expresso pela (Equação 2-5).

$$w = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100 = \frac{m_w}{m_3 - m_1} \times 100 \quad (2-5)$$

Onde,

w = teor de umidade (%);

m_1 = massa da cápsula metálica vazia (g);

m_2 = massa da cápsula metálica e amostra úmida (g);

m_3 = massa da cápsula metálica e amostra seca (g);

m_w = massa de água na amostra (g).

2.4.3 Análise granulométrica

Uma das principais características que diferenciam os solos e com grande influência na curva característica de retenção de água é o tamanho das partículas que os compõem. A granulometria, por definição, é a dimensão das partículas do material de estudo [17] e a distribuição de tamanho de partícula é dada pela proporção em massa das classes de dimensões dos grãos. Entretanto, a obtenção do aglomerado de solo com o mesmo tamanho é estimado por meio de um diâmetro equivalente [22].

O diâmetro das partículas trata-se de uma importante variável, pois refere-se à tendência da fração sólida escoar ou sedimentar após o alteamento do material que será depositado em diferentes locais de acordo com o fluxo de distribuição. Assim, visando a estabilidade do maciço e o preenchimento dos vazios entre os grãos dos rejeitos de mineração, estuda-se a estrutura e dimensão das partículas do rejeitado mineiro para avaliar seu comportamento quando lançado [7].

A análise granulométrica consiste na proporção relativa dos diversos grãos que compõem o material, podendo ser determinado através dos métodos: peneiramento e sedimentação. O objetivo do estudo é identificar a variação do tamanho dos grãos do material em relação ao conjunto [17]. A norma internacional CEN ISO/TS 17892-4 (2004) [22] descreve a peneiração como o processo pelo qual o solo é separado em classes de tamanho de partícula pelo uso de peneiras de teste e a sedimentação como o processo de fixação das partículas do solo em um líquido.

2.4.3.1 Peneiração

A metodologia da peneiração consiste em passar uma amostra de solo por uma série de peneiras teste com abertura padronizada e com tamanhos de malha sucessivamente menores. A dimensão da malha e o número de peneiras utilizadas são selecionados em função da natureza do provete [23]. É determinada a massa de solo retida em cada peneira, de acordo com sua granulometria, calculando-se a percentagem acumulada de massa que passa em cada uma delas [24]. A fração do solo passante por cada peneira é alcançada pela Equação 2-6.

$$f_n = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{m_t} \times 100\% \quad (2-6)$$

Onde,

f_n = fração que passa na peneira (%);

m_1 = massa seca de solo que passa pelo menor tamanho de malha (g);

m_2, m_n = massa seca de solo que passa pelas peneiras de malha consecutivas (g);

m_t = massa total da amostra seca (g).

A massa total obtida pela soma das massas fracionadas entre os filtros pode não corresponder a massa da amostra inicial, é comum que seja um pouco inferior devido a perdas de partícula ao longo do procedimento. São aceitáveis perdas até 1% do peso original [25].

As peneiras de teste devem ser de tela de arame de metal ou placa de metal perfurada e sua abertura deve cobrir adequadamente a faixa para o tipo de material estudado. O diâmetro dos grãos é considerado o equivalente à abertura nominal de cada peneira [22]. A projeção do ensaio de peneiração é exemplificada na Figura 2-7.



Figura 2-7: Ensaio de peneiração
Fonte: [26]

Segundo a norma brasileira, ABNT NBR 7181 (2016) [27], a abertura nominal da malha das peneiras são 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm, 4,8 mm, 2,0 mm, 600 μm , 420 μm , 250 μm , 150 μm e 75 μm . Já a norma europeia NP EN 933-2 [28] é embasada pela norma internacional CEN ISO/TS 17892-4 (2004), e trata como abertura nominal da malha as dimensões de 125 mm, 63 mm, 31,5 mm, 16 mm, 8 mm, 4,0 mm, 2,0 mm, 1,0 mm, 500 μm , 250 μm , 125 μm e 63 μm e complementa que para ensaios especiais, as peneiras devem seguir a série R 20 recomendada pela norma internacional ISO 565. Os solos muito finos, com granulometria inferior a 63 μm , são tratados por meio do ensaio de sedimentação.

2.4.3.2 Sedimentação

A sedimentação é utilizada quando a dimensão dos grãos é muito pequena, de forma que não seja possível separar suas partículas por meio do peneiramento. Quando uma amostra previamente homogeneizada é colocada em suspensão num fluido em um recipiente e deixada em repouso, nota-se que as partículas mais grossas são depositadas no fundo, as partículas de granulometrias intermediárias ficam distribuídas em diversas alturas e as partículas finas permanecem em suspensão [29] por um período de tempo maior.

O princípio do ensaio corresponde a analisar a velocidade com que o mineral decanta de acordo com sua forma, tamanho, peso e a viscosidade da água [17] numa proveta com solução defloculante durante diferentes intervalos de tempo [30]. As partículas maiores tendem a afundar mais rápido em relação às menores.

Os rejeitos de mineração são constituídos por grãos de diferentes formatos, dessa forma, têm-se o conceito de diâmetro equivalente que permite a generalização do tamanho das partículas [25]. O diâmetro equivalente estimado, nesse caso, é calculado a partir da sedimentação com

base na Lei de Stokes e assumindo que as partículas são esféricas e de mesma densidade pré-estabelecida [22].

“A Lei de Stokes baseia-se no princípio de que uma esfera, ao cair no interior de um fluido, está sujeita à atuação de duas forças contrárias: a da resistência do fluido, devido a sua viscosidade, e a força da gravidade.” [25]

A velocidade (v) de sedimentação, pela Lei de Stokes, é dada pela Equação 2-7.

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18 \cdot \mu} \cdot D^2 \quad (2-7)$$

Onde,

ρ_s = densidade específica do material (g/cm³);

ρ_w = densidade específica do fluido (g/cm³);

μ = viscosidade do fluido;

D = diâmetro do grão (cm).

No laboratório, adiciona-se o solo ao cilindro de ensaio que irá sedimentar, coloca-se então o densímetro que irá medir o peso específico ao redor de seu bulbo dado um determinado tempo e profundidade. Este peso específico considera a quantidade de partículas presente por unidade de volume naquela profundidade. Assim, as partículas, no tempo t e em uma profundidade h , terão um diâmetro D [31]. O experimento é exemplificado na Figura 2-8.

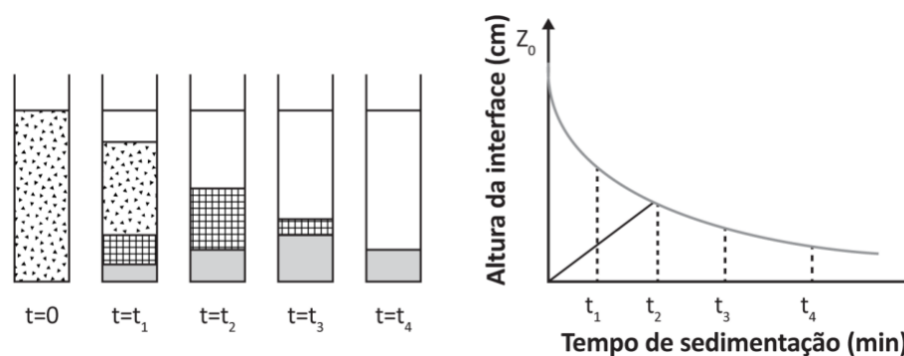


Figura 2-8: Etapas do ensaio de sedimentação descontínua e curva típica
Fonte: [10]

A norma internacional, CEN ISO/TS 17892-4 (2004) [22], regulamenta o ensaio de sedimentação por meio de duas técnicas: método do hidrômetro e método da pipeta.

O primeiro método, o método do hidrômetro exemplificado na Figura 2-9, tem como premissa a sedimentação dos grãos em água dentro de um tubo de vidro graduado e provido de um densímetro que tem a finalidade de medir a densidade média de acordo com a concentração de partículas junto ao densímetro, distribuídas entre as posições – topo, meio e fundo – do recipiente [31], em função do tempo, permitindo identificar a distribuição granulométrica das partículas conforme a suspensão é reduzida [25].

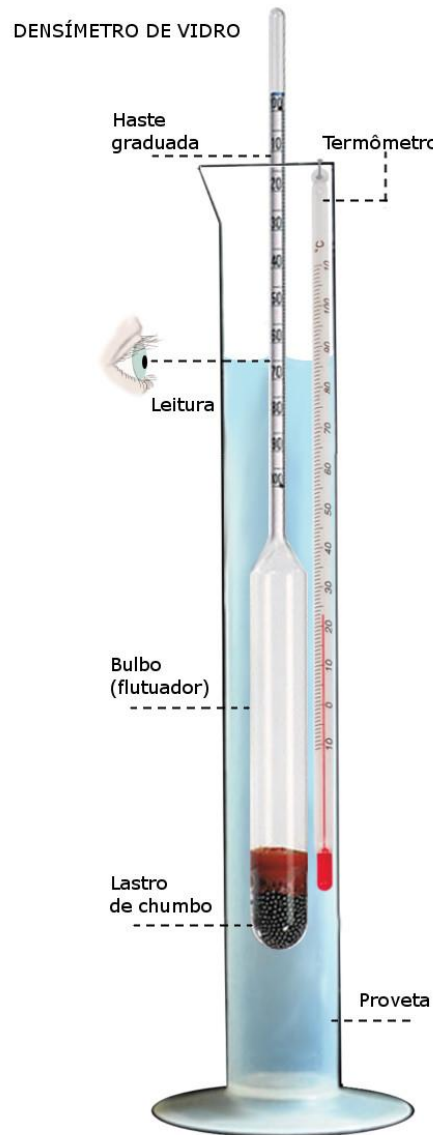


Figura 2-9: Densímetro de vidro
Fonte: [32]

Inicialmente, separam-se duas amostras de material passante pela peneira de 2 mm. A primeira parcela é destinada a recolha da umidade presente no material, a segunda porção é reservada para o ensaio.

Então, num frasco de vidro, adiciona-se solução dispersante e agita-se a mistura com o auxílio de um agitador mecânico, de modo que todos os grãos da amostra permaneçam desagregados. A suspensão de solo deve ser transferida ao tubo de vidro graduado e completada até atingir a marca de 1000 ml com água destilada. Novamente, agita-se a mistura, aciona-se o cronômetro e, na sequência, inicia-se a coleta das medições, em diferentes intervalos de tempo, após inserir o densímetro na suspensão permitindo que flutue livremente. A cada recolha de dado por meio do densímetro, a temperatura de ensaio carece de registro, para calibração do modelo [22].

A massa total seca da amostra é obtida pela Equação 2-8.

$$m = m_w \times \frac{100}{100+w} \quad (2-8)$$

Onde,

m = massa seca de solo (g);

m_w = massa úmida de solo (g);

w = teor de umidade (%).

A leitura real do densímetro é expressa por meio da Equação 2-9.

$$R_h = R'_h \times C_m \quad (2-9)$$

Onde,

R_h = leitura real do densímetro (g/cm³);

R'_h = leitura observada do densímetro (g/cm³);

C_m = correção do menisco¹.

A correção do menisco é feita inserindo o densímetro num cilindro de sedimentação, contendo cerca de 800 ml de água destilada. O olho deve ser corrido de baixo para cima em relação ao plano da superfície da água, até que a superfície vista com o formato de elipse se torne linha reta. Então, esse ponto é determinado na escala do densímetro como limite inferior (Figura 2-10).

Em seguida, o mesmo procedimento é realizado, mas na orientação de cima para baixo, até que a interceptação do menisco ocorra em linha reta, identificando o limite superior na escala do densímetro. A diferença entre as duas leituras corresponde à correção do menisco (C_m).



Figura 2-10: Correção da leitura do menisco
Fonte: [33]

¹ Menisco: Corresponde à haste graduada do densímetro.

Nos casos em que o densímetro não está calibrado, utiliza-se do Anexo A da ISO/TS 17892-4 (2004) [22]. A correção da profundidade efetiva do densímetro ou do hidrômetro é determinada pela Equação 2-10, a seguir.

$$H_r = H + 0,5\left(h - \frac{V_h}{900}L\right) \quad (2-10)$$

Onde,

H_r = profundidade efetiva do densímetro para as principais marcas de leitura (mm);

H = comprimento do colo do bulbo até a graduação R_h (mm);

h = comprimento do bulbo (mm);

V_h = volume do bulbo (ml);

L = distância entre a marcação da escala de 100 ml e 1000 ml no cilindro de sedimentação (mm).

A Figura 2-11, a seguir, auxilia na identificação de cada elemento de calibração do densímetro.

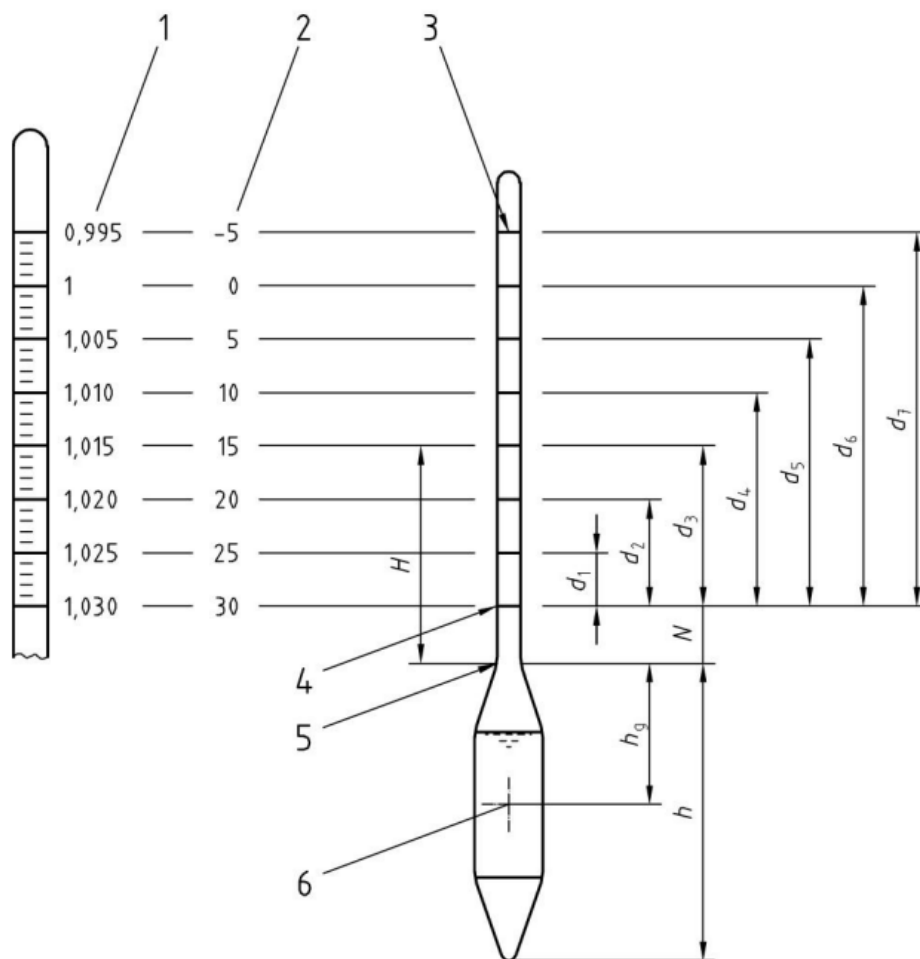


Figura 2-11: Leitura do densímetro

Fonte: [22]

Em que os números indicados correspondem a:

- 1 – Marcações de densidade relativa do hidrômetro;
- 2 – R_h (leitura real do densímetro) equivalente;
- 3 – Principais marcas de calibração;
- 4 – Marca de calibração mais baixa;
- 5 – Pescoço do bulbo;
- 6 – Centro de volume do bulbo.

O cilindro de sedimentação (Figura 2-12) também é corrigido através da relação (Equação 2-11) abaixo.

$$0,99L_r < L < 1,01L_r \quad (2-11)$$

Onde,

L = distância entre a marcação da escala de 100 ml e 1000 ml no cilindro de sedimentação (mm);

L_r = distância média entre a marca de 100 ml e 1000 ml correspondente a um volume de líquido de controle.

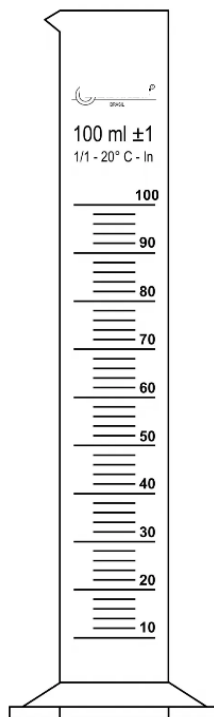


Figura 2-12: Correção do cilindro graduado de sedimentação
Fonte: [33]

Por fim, definição do diâmetro equivalente das partículas por meio Lei de Stokes Equação 2-12.

$$d_i = 0,005531 \sqrt{\frac{\eta \times H_r}{(\rho_s - \rho) \times t}} \quad (2-12)$$

Onde,

d_i = diâmetro equivalente da partícula (mm);

η = viscosidade dinâmica do fluido (Quadro 2-2);

H_r = profundidade efetiva do densímetro (mm);

ρ_s = densidade de partículas (mg/m³);

t = tempo (min).

Quadro 2-2: Viscosidade dinâmica da água

Temperatura (°C)	Viscosidade η (mPa.s)
10	1,304
15	1,137
20	1,002
25	0,891
30	0,798
Nota: Os valores intermediários devem ser calculados por interpolação	

Fonte: Adaptado de [22]

A leitura modificada do densímetro é calculada pela Equação 2-13.

$$R_d = R'_h - R'_0 \quad (2-13)$$

Onde,

R_d = leitura modificada do densímetro (g/cm³);

R'_0 = leitura observada do densímetro na solução de referência (g/cm³).

Se, durante o ensaio, for identificado variação de temperatura, a correção de leitura deve ser realizada substituindo R'_0 da Equação 2-13 pelo valor obtido utilizando a Equação 2-14.

$$R'_0(\text{corrigido}) = R'_0 + CT \quad (2-14)$$

Onde,

$R'_0(\text{corrigido})$ = leitura corrigida do densímetro na solução de referência (g/cm³);

CT = correção de temperatura (Quadro 2-3).

Quadro 2-3: Correção de temperatura para a leitura do densímetro

T °C	CT	T °C	CT
7	-0,0013000	20	+0,0000
8	-0,0013	21	+0,0002
9	-0,0013	22	+0,0004
10	-0,0013	23	+0,0006
11	-0,0012	24	+0,0008
12	-0,0012	25	+0,0010
13	-0,0011	26	+0,0013
14	-0,0009	27	+0,0015
15	-0,0008	28	+0,0018
16	-0,0006	29	+0,0020
17	-0,0005	30	+0,0023
18	-0,0003	31	+0,0026
19	-0,0002	32	+0,0030

Fonte: [22]

A leitura real do densímetro é expressa por meio da Equação 2-15.

$$K = \frac{100 \times \rho_s}{m(\rho_s - 1)} \times R_d \quad (2-15)$$

Onde,

K = fração menor do diâmetro equivalente (%).

O segundo método é o método da pipeta e a determinação da granulometria é realizada fracionando previamente uma quantidade de material fino em tamanhos pré-estabelecidos. Tendo em vista as dimensões conhecidas do material, retira-se porções da amostra por pipetagem, utilizando-se das velocidades de sedimentação de cada uma das frações, em uma profundidade tal qual garanta que os tamanhos das partículas sejam iguais, por meio da Lei de Stokes [25].

Assim como o método do hidrômetro, primeiramente, deve-se separar o material em duas amostras destinadas à recolha do teor de umidade e ao ensaio da pipeta (Figura 2-13). Inicialmente, coloca-se o material reservado ao ensaio num frasco cônico com a adição de solução dispersante e mistura-se o material e a solução com a ajuda de um agitador mecânico para a desagregação das partículas. A suspensão de solo deve ser transferida ao tubo de vidro graduado e completada até atingir a marca de 1000 ml com água destilada.

Nesse caso, agita-se a mistura final, aciona-se o cronômetro e a mistura em suspensão deve-se repousar por 12 horas em banho-maria. Em seguida, insere-se cuidadosamente a pipeta até a profundidade estabelecida, gradualmente enche-se a pipeta que será esvaziada num prato de evaporação. O procedimento deve ser realizado com pelo menos 3 profundidades de leitura e a cada recolha, a temperatura de ensaio carece de registro, para calibração do modelo[22].

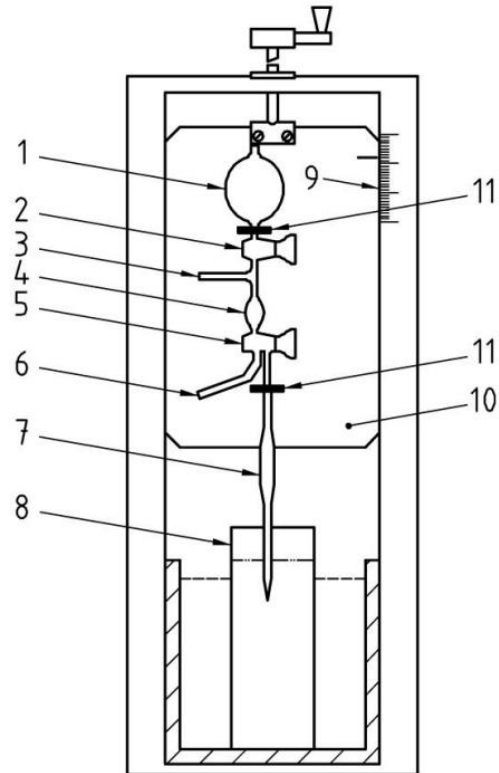


Figura 2-13: Leitura da pipeta
Fonte: [22]

Em que os números indicados correspondem a:

- 1 – Bulbo;
- 2 – Torneira de parada;
- 3 – Entrada de sucção do bulbo de segurança;
- 4 – Bulbo de segurança;
- 5 – Torneira de três vias;
- 6 – Tubo de saída;
- 7 – Pipeta de amostragem;
- 8 – Cilindro de sedimentação;
- 9 – Escala graduada;
- 10 – Painel deslizante;
- 11 – Braçadeiras.

A profundidade de inserção da pipeta, segundo a normativa CEN ISO/TS 17892-4 (2004) [22], é definida pelo Quadro 2-4, a seguir.

Quadro 2-4: Profundidade de inserção da pipeta

Temperatura da suspensão (°C)	Fração de partículas limite superior (µm)						
	38	25	20	16	8	4	2
	Tempo de acomodação						
	90 s	320 s	6 min	15 min	20 min	1 h	4 h
Profundidade de inserção da pipeta (mm)							
15,0	99	153	110	176	59	44	44
15,5	100	155	112	179	60	45	44
16,0	102	157	113	181	60	45	45
16,5	103	159	115	183	61	46	46
17,0	104	161	116	186	62	46	46
17,5	106	163	118	188	63	47	47
18,0	107	166	119	191	64	48	47
18,5	108	168	121	193	64	48	48
19,0	110	170	122	196	65	49	49
19,5	111	172	124	198	66	50	49
20,0	112	174	125	201	67	50	50
20,5	114	176	127	203	68	51	50
21,0	11	178	128	205	68	51	51
21,5	117	180	130	208	69	52	52
22,0	118	183	132	210	70	53	52
22,5	119	185	133	213	71	53	53
23,0	121	187	135	215	72	54	54
23,5	122	189	136	218	73	54	54
24,0	124	191	138	221	74	55	55
24,5	125	194	139	223	74	56	55
25,0	127	196	141	226	75	56	56

Fonte: Adaptado de [22]

A massa total seca (m) é calculada pela Equação (2-8), a fração passante de material fino por meio de peneiras é dada pela Equação (2-6) e o diâmetro equivalente de partículas é definido pelo Quadro 2-4. Então, obtém-se a fração da amostra menor que o diâmetro equivalente utilizando a expressão abaixo (Equação 2-16).

$$K = \frac{(m_{2,i} - m_{1,i} - m_b) \times V_1}{V_2 \times m} \times 100\% \quad (2-16)$$

Onde,

K = fração menor do diâmetro equivalente (%);

$m_{1,i}$ = massa do prato de evaporação vazio (g);

$m_{2,i}$ = massa do prato de evaporação com a fração seca (g);

m_b = massa de restos secos no forno do líquido de referência (g);

V_1 = volume da suspensão no cilindro de sedimentação (ml);

V_2 = volume da pipeta (ml).

2.4.3.3 Curva granulométrica

O estudo da distribuição de partículas do solo é realizado por meio da junção dos dois ensaios, peneiramento e sedimentação, que permitem o ajuste de seus dados em uma mesma escala chamada de curva granulométrica característica do solo.

Inicialmente, as escalas utilizadas foram as tradicionais lineares ou aritméticas. Notou-se que a distribuição das partículas na natureza é assimétrica de forma regular, concentrando-se nas partículas de pequenas dimensões, de modo que as escalas tradicionais não retratassem a realidade. Então, surgiu a ideia de racionar os grãos dos sedimentos na escala gaussiana ou escala de distribuições normais, que busca retratar os efeitos da natureza. Todavia, deve-se considerar interferências externas, como a velocidade de sedimentação, à aleatoriedade da natureza, de maneira que a escala gaussiana também não representasse a curva de distribuição das partículas do solo. Até que observou-se que os grupos de frações das partículas se aproximavam às escalas geométricas e às escalas logarítmicas, as quais começaram a ser utilizadas para retratar a distribuição de tamanhos [25].

Os estudos alcançaram a curva (Figura 2-14) que hoje é definida entre a abertura da malha (diâmetro das partículas) – eixo das abcissas – em escala logarítmica e o percentual de material que passa pela peneira – eixo das ordenadas – em escala linear.

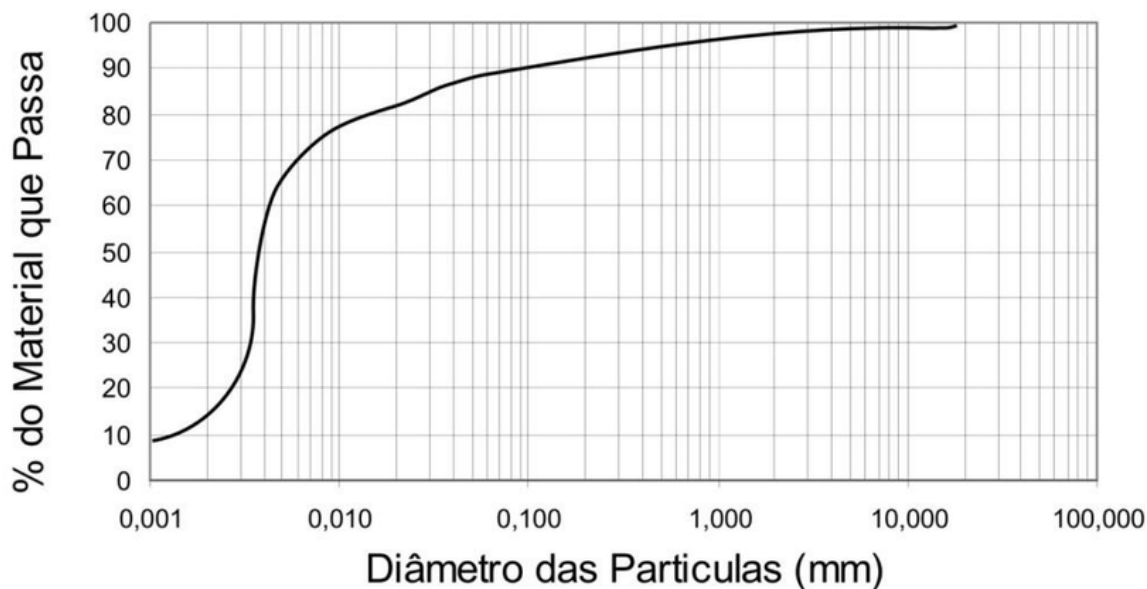


Figura 2-14: Curva característica de distribuição granulométrica

Fonte: [34]

2.4.4 Limites de Atterberg

No início do século XX, o cientista Atterberg estudou o solo, a fim de analisar a natureza coesiva causada pela água presente no material. O trabalho desenvolvido pelo sueco consiste na redução progressiva da umidade do solo desde o estado líquido ao estado sólido, obtendo-se

uma curva que permite relacionar a consistência de solos com grãos finos e o teor de umidade variável [17].

A mistura água-solo na presença de muita umidade, apresenta aspecto de líquido. Reduzindo pouco a pouco o teor de água na amostra, nota-se um comportamento moldável do conjunto (estado plástico). Gradualmente, obtém-se um composto moldável, só que agora divisível em fragmentos (estado semissólido). Por fim, chega-se num material que passa a ter volume constante e aparência sólida [5].

Durante sua pesquisa, Atterberg observou que a consistência da amostra granular se alterava conforme sua umidade (Figura 2-15), definindo, então, os limites correspondentes ao estado aparente do material no tempo de transição em que os estados – sólido, semissólido, plástico e líquido – do solo se diferencia, nomeando os estágios de transformação como limite de contração (*LC*) ou limite de retração (*LR*), limite de plasticidade (*LP*) e limite de liquidez (*LL*) [31]. O comportamento do estado do solo junto à água é exemplificado na.

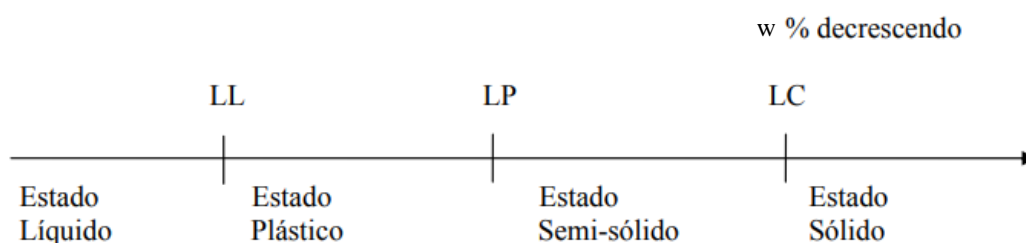


Figura 2-15: Estados de consistência

Fonte: [1]

O limite de contração é definido pela umidade do solo durante a passagem entre o estado sólido e semissólido. Já o limite de plasticidade é estabelecido pela transição entre o solo no estado semissólido e o estado plástico. Por último, o limite de liquidez que é determinado pela mudança entre os estados plástico e líquido [30]. A norma internacional que regulamenta os ensaios para os limites líquidos é a CEN ISO/TS 17892-12 (2004). No Brasil, a norma correspondente é a ABNT NBR 6459 (2016). Em Portugal, os limites de Atterberg são definidos pela norma portuguesa NP-143 (1969). O comportamento do estado do solo junto à água é exemplificado na Figura 2-16.

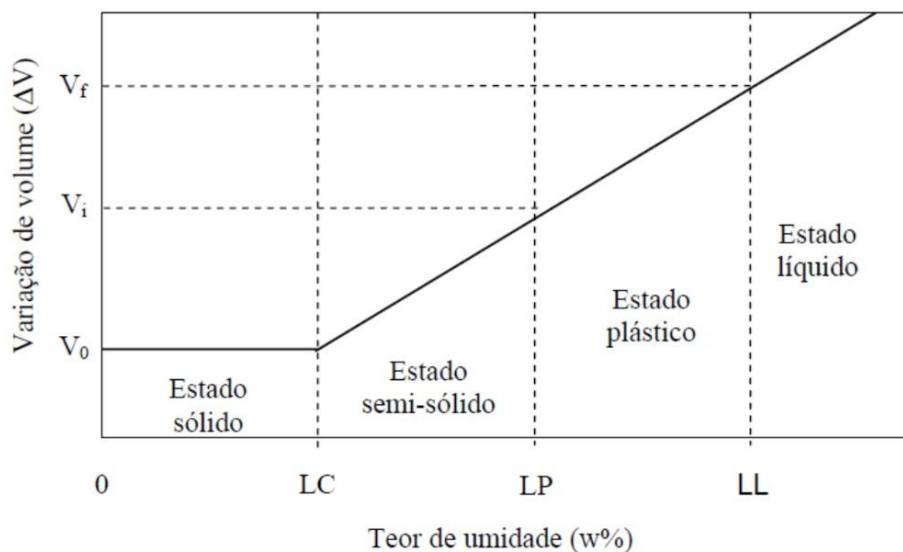


Figura 2-16: Definição dos limites de Atterberg
 Fonte: [35]

A determinação dos limites de liquidez, de plasticidade e de retração é realizada em solos com características coesivas, portanto, os ensaios são adequados para solos argilosos e siltosos em que não haja predominância de grãos de areia. Assim, recomenda-se o ensaio para solos com cerca de 30%, ou mais, em massa, de partículas finas inferiores a 0,5 mm [36].

2.4.4.1 Limite de liquidez

O limite de liquidez, previamente exposto, reflete o teor de umidade definido pela mudança entre o estado plástico e o estado líquido do solo. Apesar da atenção de Atterberg sobre o assunto, foi Casagrande quem projetou o equipamento (Figura 2-17) para realização do ensaio de liquidez anos depois [19]. O aparelho consiste em uma concha de latão, excêntrica, sobre um suporte de base rígida operada por uma manivela que permite a queda (pequenos golpes) da amostra com intensidade constante [1].

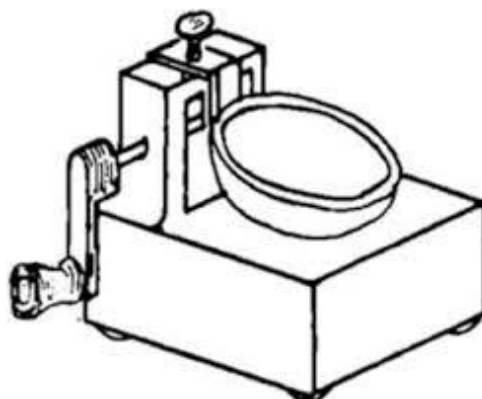


Figura 2-17: Aparelho Casagrande
 Fonte: Adaptado de [37]

A execução do ensaio tem início no destorroamento e na homogeneização da amostra com água destilada, determinando-se sua umidade. Em seguida, coloca-se a pasta sobre a concha com

altura central de aproximadamente 10 mm. Então, um sulco é feito dividindo o material em 2 partes [31]. Conta-se e anota-se o número de golpes necessário para provocar o fechamento da fenda. O limite de liquidez é atingido quando a amostra realizar seu fechamento com 25 quedas, para isso, é necessário adicionar água na pasta ao longo do ensaio e registrar a umidade da amostra [1]. Caputo inclui que é possível determinar o LL por meio da equação desenvolvida pelos estudos da *Federal Highway Administration* (Equação 2-17), para solos plásticos.

$$LL = \frac{w}{1,419 - 0,3 \log n} \quad (2-17)$$

Onde,

w = teor de umidade (%);

n = número de golpes.

A norma portuguesa, NP-143 (1969) [36], ainda acrescenta que o limite de liquidez pode ser obtido por meio da interpolação de uma curva, resultado de 4 testes distintos, em que relaciona o teor de água para cada teste e o número de golpes contadas pelo aparelho de Casagrande, até que o sulco se feche em aproximadamente 1 cm.

2.4.4.2 Limite de plasticidade

Segundo a norma brasileira, ABNT NBR 7180 (2016) [38], plasticidade é a propriedade que permite os solos submeterem a grandes deformações permanentes, sem sofrer ruptura, fissura ou intenso acréscimo volumétrico, dada uma faixa de umidade. O limite de plasticidade, como apresentado anteriormente, representa o teor de umidade no qual ocorre a transição do solo do estado semissólido para o estado plástico.

O ensaio comumente utilizado para a determinação do LP é simples e de fácil execução (Figura 2-18). Com a massa do objeto de estudo, busca-se moldar um cilindro por meio de rolamentos repetitivos e uniformes. Quando se nota a fratura da amostra correspondente às dimensões do cilindro de 3 mm de diâmetro e aproximadamente 10 cm de comprimento, define-se a percentagem de umidade desta [1]. Na impossibilidade de estabelecer o limite de plasticidade, a ABNT NBR 7180:2016 [38] recomenda adotar como material não plástico.

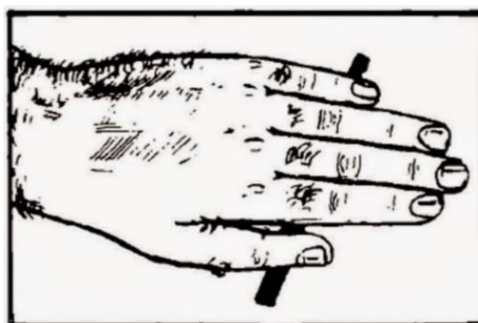


Figura 2-18: Ensaio de limite de plasticidade
Fonte: [1]

A norma NP-143 (1969) [36] trata da plasticidade como a média, em percentagem, do teor de água resultante de 4 testes diferentes, ao rolar, com as mãos, uma amostra de solo e água sobre uma superfície de vidro formando um filamento cilíndrico com cerca de 3 mm de diâmetro.

2.4.4.3 Índices

O índice de plasticidade (I_P) traduz o nível de coesão do solo e está diretamente ligado à amplitude da faixa de plasticidade [31]. Ou seja, representa a quantidade de água necessária a acrescentar para que o solo passe do estado plástico para o estado líquido e é definido pela Equação 2-18.

$$I_P = LL - LP \quad (2-18)$$

Onde,

LL = limite de liquidez;

LP = limite de plasticidade.

O índice de consistência (I_C) aponta o teor de umidade do solo dentro do intervalo de plasticidade para a utilização prática do material. Esse índice é determinado pela Equação 2-19.

$$I_C = \frac{LL-w}{LL-LP} \quad (2-19)$$

Onde,

w = teor de umidade.

O índice de liquidez (I_L) reflete a consistência relativa de um solo coesivo em seu estado natural e é dado pela Equação 2-20.

$$I_L = \frac{w-LP}{LL-LP} \quad (2-20)$$

2.4.5 Curva de retração

Os solos com características expansivas ou retráteis são aqueles que apresentam aumento ou redução volumétrica acentuada quando ocorre variação do teor de umidade [39]. Assim como o limite de liquidez e o limite de plasticidade, o limite de contração do material descreve a consistência do solo, mas, nesse caso, trata do limite inferior de umidade. O limite inferior corresponde a zona de friabilidade quando o material não possui características moldáveis [40].

A norma portuguesa, NP- 43 (1969), define o limite de retração como a média do teor em água de 4 amostras em que cada uma delas representa a diferença entre a quantidade de água inicial do ensaio e sua redução de volume durante a redução de água [36]. Assim, a curva de retração é estabelecida por meio da relação entre teor de umidade e a variação volúmica da amostra, como mostra a curva típica de teor em água do solo retratada na Figura 2-19.

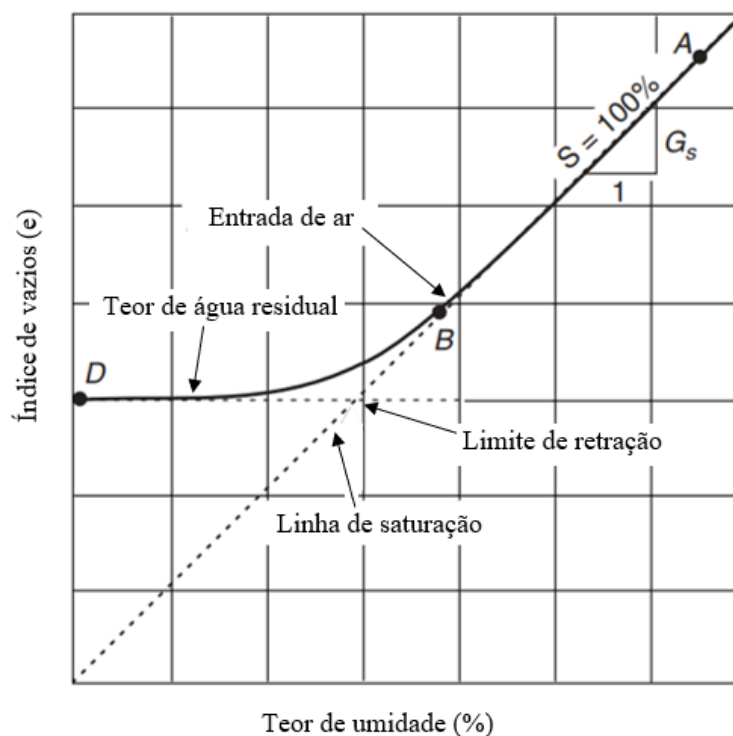


Figura 2-19: Curva de retração típica
Fonte: Adaptado [41]

Inicialmente, a curva é definida pelo estado líquido no qual o solo se encontra completamente saturado. Pouco a pouco, decrescendo a quantidade de água do solo, o volume também é reduzido igualmente, até que, em um determinado momento, o volume de decaimento não será o mesmo. Isto acontece, pois, os vazios, onde habitualmente estavam completos por água, passam a ser preenchidos pelo ar. Nesse momento, conforme a secagem do material, o volume é reduzido não só pelas perdas de água como também, pelas forças de sucção que surgem ao redor das partículas. Até que o solo esteja completamente seco e atinja um volume que possa ser considerado constante [5].

A atração superficial entre as partículas do solo provoca o ajuste entre os grãos sem cessar, mesmo quando o solo está seco. Dessa forma, a curva de retração mais próxima à realidade é representada por uma hipérbole finalizada por meio de uma assíntota horizontal [5].

O ensaio é realizado determinando o volume de uma cápsula de contração pelo preenchimento com mercúrio líquido. Em seguida, o solo saturado com água e desprovido de bolhas de ar é colocado na cápsula vazias em até 1/3 de sua capacidade de modo que ocupe todo o fundo e obtenha uma superfície plana. Então, seca-se a amostra, ao ar e em seguida em estufa, até se atingir constância de sua massa e anota-se a massa de solo seco contido na cápsula de contração (Figura 2-20). O volume da pastilha seca é determinado colocando-a numa cuba de vidro completada pelo mercúrio e comprimindo-a de modo que seja saturada pelo líquido. O volume do mercúrio deslocado corresponde ao volume da amostra seca (Figura 2-21) [42]. O limite de retração é resultado da média aritmética entre 4 provetes ensaiados e é expresso em porcentagem [36].



Figura 2-20: Cápsula de contração

Fonte:[42]

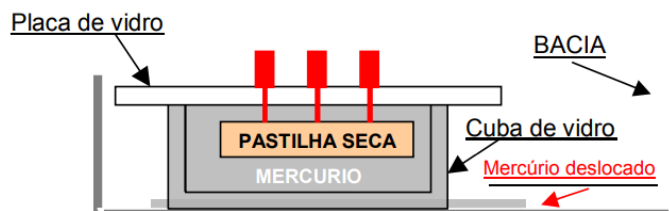


Figura 2-21: Determinação do volume da pastilha seca

Fonte: [42]

O procedimento tradicional, fornecido pelas normas NP-143 (1969) e CEN ISO/TS 17892-12 (2004), para a obtenção do limite de retração utiliza-se de mercúrio que pode provocar efeitos prejudiciais tanto à saúde humana quanto ao meio ambiente [40]. Dessa forma, a técnica é comumente realizada apenas para solos em que apresentam alto índice de plasticidade [42].

2.4.6 Classificação dos solos

O solo é definido, segundo a ABNT NBR 6502 (2022) [43], como um material proveniente da decomposição das rochas, pela ação de agentes físicos ou químicos, ou da sedimentação não consolidada de seus grãos, podendo ou não ter matéria orgânica. Com o intuito de complementar a caracterização dos solos por meio dos ensaios laboratoriais, surgiu a necessidade de estabelecer uma regra de identificação do solo [44].

Os sistemas de classificação utilizam de análises qualitativas (aspecto visual) e quantitativas (valor numérico) em relação às suas características [45]. Em geral, a identificação de um solo tem como base a composição mineral, conteúdo orgânico e suas propriedades naturais como textura, densidade dos grãos, granulometria, consistência e plasticidade, friabilidade, formato dos grãos e outros [42]. O principal objetivo de aplicação na engenharia é estimar o provável comportamento dos solos para conduzir a um projeto executivo seguro ou a uma investigação necessária [17]. São vários os sistemas de classificação, mas o modelo comumente utilizado é o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).

O sistema unificado de classificação dos solos foi desenvolvido em 1942 por Casagrande [45] e, mais a frente, adaptado e normalizado por instituições como a ASTM D 2487-06 [46]. Atualmente, o modelo relaciona granulometria, plasticidade e consistência do solo.

A norma brasileira, ABNT NBR 6502 (2022), caracteriza o tipo de solo como: pedregulho é um solo formado por minerais ou partículas rochosas que apresentam diâmetro característico entre 2 mm e 60 mm; areia é um solo não coesivo e não plástico composto por minerais ou partículas rochosas que possuem diâmetro característico entre 0,06 mm e 2 mm; silte é um solo

com pouca ou nenhuma plasticidade, de baixa resistência quando seco ao ar e formado por partículas finas que apresentam diâmetro característico entre 0,02 mm e 0,06 mm; por fim, a argila que é um solo que apresenta coesão e plasticidade, de granulometria muito fina e partículas com diâmetro característico menor que 0,02 mm [42].

A norma internacional, CEN ISO 14688-1 (2018), identifica os solos de acordo com a plasticidade conforme a Tabela 2-1. Ainda, a norma brasileira, ABNT NBR 7250 (1982) [47], esclarece que plasticidade é uma propriedade dos solos finos a submissão de grandes deformações permanentes sem que sofra ruptura, fissuração ou variação volumétrica considerável.

Tabela 2-1: Plasticidade dos solos

Plasticidade	Critério
Não plástico	Uma linha de 3 mm não pode ser enrolada com nenhum teor de água.
Baixa	O fio mal pode ser enrolado e o caroço não pode ser formado quando mais seco do que o limite de plástico.
Média	O fio é fácil de enrolar e não é necessário muito tempo para atingir o limite de plástico. A rosca não pode ser enrolada novamente após atingir o limite de plástico. O caroço desmorona quando mais seco do que o limite de plástico.
Alta	Leva um tempo considerável rolando e amassando para atingir o limite de plástico. O fio pode ser enrolado várias vezes após atingir o limite de plástico. O caroço pode ser formado sem desmoronar quando mais seco do que o limite plástico.

Fonte: Adaptado de [44]

Contudo, outra forma de classificar o solo seguindo o critério de plasticidade, corresponde ao modelo SUCS e faz o uso da carta de plasticidade de Casagrande (Figura 2-22).

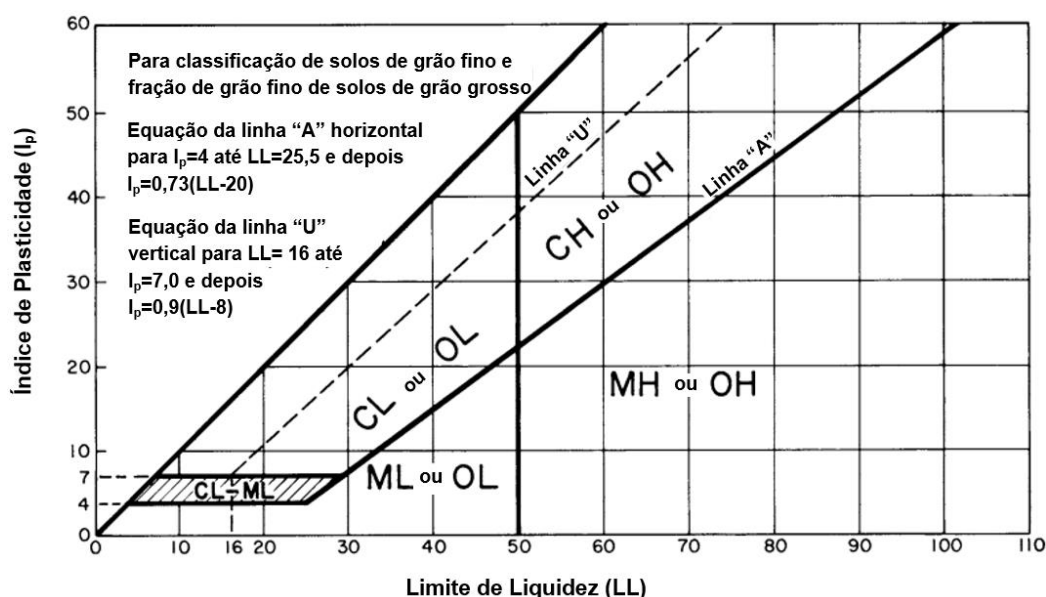


Figura 2-22: Carta de plasticidade de Casagrande
Fonte: Adaptado de [46]

Já em relação à consistência do solo, a classificação quantitativamente é estabelecida por meio do índice de consistência e qualitativamente é definida por meio da Tabela 2-2. A ABNT NBR 7250 (1982) [47] acrescenta que consistência corresponde à facilidade com a qual o solo se deforma.

Tabela 2-2: Consistência dos solos

Consistência	Critério
Muito mole	Se escorre entre os dedos, quando apertada nas mãos.
Mole	Se pode ser facilmente moldada pelos dedos.
Média	Se pode ser moldada pelos dedos.
Rija	Se requer grande esforço para ser moldada pelos dedos.
Dura	Se não pode ser moldada e, quando submetida à grande esforço, os torrões desagregam-se.

Fonte: Adaptado de [42]

2.5 Água nos rejeitos de mineração

A água presente nos rejeitos de minério tem ampla influência sobre empregabilidade do material. Sabe-se que durante as etapas de beneficiamento do minério obtém-se o subproduto com grande volume de água. O material chega aos reservatórios com aspecto líquido e baixa consistência, dificultando o manuseio e prejudicando a qualidade da estrutura.

À medida que a água é removida, é possível dispor o material em diferentes moldes e extrair o melhor de sua forma, por meio do grau de adesão entre as partículas que corresponde à consistência do material sob as condições de umidade [40]. Para obter uma resistência favorável de projeto é necessário analisar o potencial com que o material perde ou retém água para o meio em que está inserido.

2.5.1 Sucção

Assim como muitos materiais existentes na natureza, os rejeitos de mineração são substâncias porosas e seus vazios são comumente preenchidos por água, formando uma fina película de água e ar entres as partículas. A película presente no interior dos poros facilita a união dos grãos que se dá por meio da tensão de tração dos materiais, denominada tensão superficial que decorre dos esforços de atração entre as moléculas. Esta força permite o armazenamento de energia interna causada pela água [48].

A facilidade com que o sistema água-solo perde ou absorve água, interferindo diretamente no grau de saturação da composição, é chamada de sucção, a qual sofre influência das características do material como origem, densidade e umidade [49]. Brevemente definida por Marinho [50] como a energia de absorção de água do solo em seu estado livre.

Outra forma de descrever o fenômeno da sucção se dá por meio da diferença de pressão entre as partículas e as gotículas de água que esclarecem a movimentação das parcelas de água entre os poros do solo [51].

A sucção do solo é dada pela soma de duas componentes – sucção matricial e sucção osmótica – e tem como denominação sucção total [52]. Sucção matricial está relacionada ao fenômeno de capilaridade, decorrente da tensão superficial da água, ou seja, trata da interação da água na fase gasosa com a partícula de solo. Já a componente osmótica é derivada da presença e da concentração de sais dissolvidos na água entre os poros ao longo da superfície dos grãos que reduz a umidade relativa do material [51].

O fenômeno de capilaridade, que ocorre durante a sucção matricial, está presente nos poros e se relaciona com as forças atrativas (de coesão) entre as moléculas de água [53]. A adsorção, que também interfere na sucção matricial, atua sobre a superfície dos grãos e está relacionado ao tipo de partícula e seu arranjo estrutural [54]. Ambas ocorrências influenciam na afinidade entre solo e água [53].

A sucção osmótica do solo é justificada pela presença de sais dissolvidos na água. A tendência da solução salina é reter o líquido. Desse modo, é necessária maior energia para a remoção de moléculas de água do material. Esta manifestação não é limitada a solos não-saturados, por se tratar de uma ocorrência dependente das propriedades mineralógicas do composto [51]. Assim, a sucção osmótica, em muitos casos, é considerada constante ou desprezível, pois apresenta pequenas variações em relação ao teor de umidade [48].

2.5.2 Curva de retenção

A energia de sucção é utilizada, especialmente, para situações em que o solo se encontra no estado não-saturado, todavia outras variáveis para a medição de água no solo em seu estado natural devem ser observadas. A retenção da água no solo representa a capacidade de armazenamento de água que o solo possui, sendo baseada na relação entre o conteúdo de água no solo e a tensão de retenção e surge em função da estrutura nos baixos valores potenciais condicionado pela presença de poros, pela granulometria e mineralogia das partículas [55].

A análise das características de retenção de água pelo solo é feita utilizando a curva característica de retenção de água, relacionando teor de água ou grau de saturação com a sucção, que expressa a força de ligação entre os grãos de solo e as moléculas de água [56]. O cruzamento entre a sucção e presença de água origina a curva característica de água do solo, no inglês *Soil Water Characteristic Curve (SWCC)*, que propicia a avaliação das propriedades insaturadas do solo [41]. Em outras palavras,

“a curva característica de um solo é definida como a relação entre a quantidade de água e a sucção do solo.” [49]

Outra forma de nomear a *SWCC* é curva de retenção e seu estudo ganha importância na área da engenharia civil, principalmente, em meios porosos, pois quando o solo apresenta grande

número de vazios, pode-se identificar baixa capacidade de retenção de água e alto grau de infiltrações. Dessa forma, expõe-se a qualidade da construção que apresenta potencial de afetar a impermeabilização da estrutura ou das obras de pavimentação, por exemplo [57].

A partir da curva de retenção é possível prever situações relativas à condutividade hidráulica, resistência ao cisalhamento e variações volumétricas, quando relacionadas à mecânica dos solos em seu estado não-saturado [58].

Conforme observado, diversos fatores influenciam no aspecto da *SWCC*. Lira (2018) [52] cita como fatores principais o tipo do solo considerando sua estrutura e agregação, o teor de umidade inicial, índice de vazios, a textura, a mineralogia, as tensões e os métodos de compactação. Nesse contexto, é evidenciado a importância da curva como indicador da qualidade do solo por permitir relacionar diferentes propriedades do solo de grande relevância [53].

A curva de retenção pode ser retratada considerando diferentes variáveis, atentando-se à presença de água no solo. Os formatos mais usuais são: o teor em água gravimétrico, w , que relaciona o peso de água com o peso de partículas sólidas e o teor em água volumétrico, θ , que relaciona o volume de água com o volume total da amostra. Ainda que menos comum, é possível encontrar curva de retenção que relaciona sucção com o grau de saturação [5].

Analisando um solo que se apresenta em equilíbrio de saturação, sob condições normais de temperatura e de pressão atmosférica, submetido à uma força de sucção, terá sua água removida. Conforme o aumento da sucção acontece e a diminuição da água disponível é reduzida, poros cada vez menores perderão água e a espessura da película de água sobre a superfície das partículas será cada vez menor [56]. Ou seja, a retenção da água possibilita analisar o provável comportamento do solo não saturado à medida que é submetido ao aumento da sucção. Sucintamente, representa o secamento do solo quanto o aumento das forças matriciais do solo.

A matriz de sucção do solo, expressa em termos de carga ou pressão, é relacionada com o conteúdo volumétrico de água ou com o grau de saturação, então obtém-se a curva característica [59]. A Figura 2-23 representa uma curva de retenção de água típica para o solo tipo argiloso.

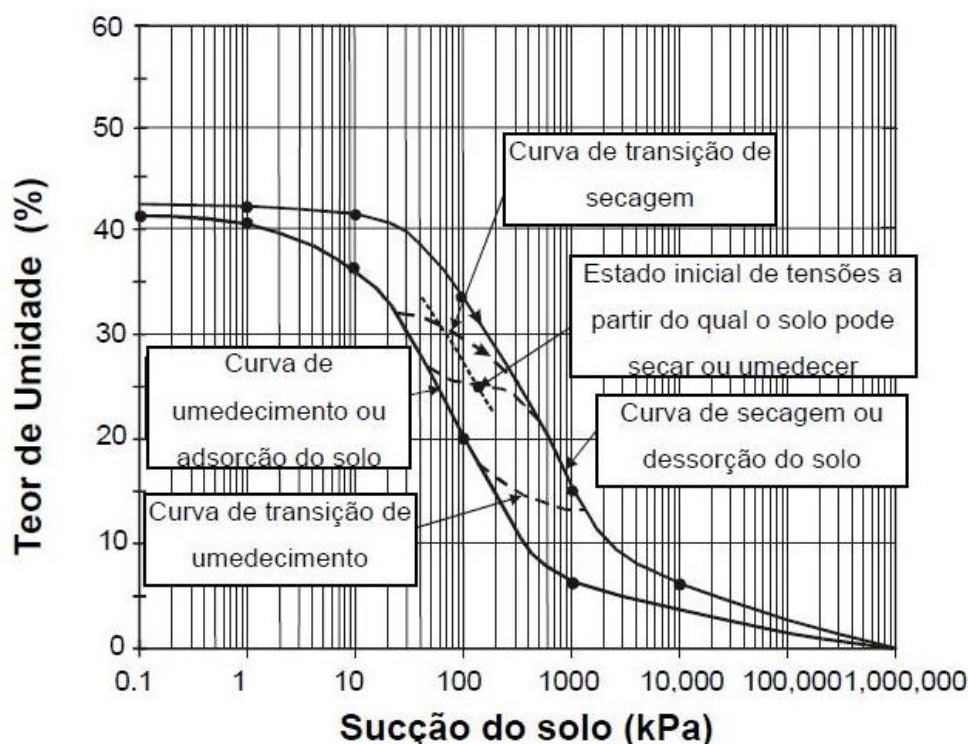


Figura 2-23: Curvas de secagem e de umedecimento e o estado inicial do solo em campo
Fonte: [60]

O procedimento para a obtenção da curva se dá por meio da exposição do solo saturado a uma força de sucção. Gradativamente, a água é drenada e os poros são preenchidos pelo ar. A medida que a água é removida do solo, as forças exigidas de sucção são acrescidas, pois a perda de água nos menores poros faz com que a espessura da película de água seja reduzida e a força de adsorção torna-se mais resistente [54].

A curva característica pode ser obtida de diversas maneiras, os métodos de determinação são classificados como diretos ou indiretos. Métodos diretos medem a pressão negativa da água dos poros através de medidores de pressão no campo atmosférico. Em contrapartida, os métodos indiretos medem a sucção causada pela pressão negativa da água por meio de materiais previamente projetados com parâmetros e propriedades definidas ([41]; [49]). Ainda que não haja um padrão para a seleção de pontos de teor de umidade para o traçado da curva de retenção, é comum que se tenha de 6 a 8 pontos para que o desenvolvimento e ajuste da curva tenham maior relevância [61].

Além disso, a curva pode ser encontrada por meio de ensaios tanto em campo quanto em laboratório, sendo esses vantajosos por permitir maior flexibilidade nas condições de ensaio, como ambiente controlado, e melhor precisão de dados [53]. A determinação da *SWCC* em laboratório pode ser realizada considerando três circunstâncias: amostra seca, amostra saturada e amostra não saturada.

A primeira premissa, nomeada por molhamento ou umedecimento, utiliza-se do solo previamente seco e, ao longo do ensaio, se faz o umedecimento gradual por redução de tensão. Já a segunda, chamada por secagem ou drenagem, trata-se do emprego de sucessivas sucções

gradativamente maiores num solo inicialmente saturado. Por fim, a terceira, que corresponde ao intermediário entre as duas circunstâncias anteriores, a partir de um teor de umidade do solo no momento de coleta ou umidade ambiente pode-se aplicar tanto o processo de molhamento quanto o de secagem [54]. Ainda que as teorias sejam complementares, é comum observar disparidade entre as curvas e a este fenômeno se dá o nome de histerese [53].

A determinação da curva tem como base o levantamento de pontos de umidade que permitem traçar um gráfico que melhor se adequa às características físico-hídricas do solo. Além disso, vale ressaltar que quanto maior o número de pontos, mais tangível será a curva de retenção estudada [61].

Vários modelos empíricos para o ajuste da curva foram desenvolvidos na tentativa de reproduzir a realidade. O modelo mais utilizado, foi desenvolvido por Van Genuchten (1980), busca estimar a quantidade de água em diferentes potenciais matriciais por meio dos parâmetros físicos do solo, de modo que possa simular os dados obtidos em campo [62].

Na década de 90, novos métodos foram concebidos. Em 1990, o modelo empírico estimava a retenção e a quantidade de água, através da classe de textura do solo [61]. Pouco mais tarde, em 1996, o modelo proposto por Brooks & Corey em 1964 foi ajustado fazendo o uso de funções não-lineares inspiradas na teoria do caos, por meio de relações físicas e comportamento das propriedades do solo. A este princípio deu-se o nome de *Extended Non – Linear Regression (ENR)* [63].

Os métodos utilizados frequentemente para a obtenção da curva característica são realizados através da secagem, como o funil de placa porosa ou funil de Haines (1930) [64], a centrífuga, o tensiômetro e o método do papel-filtro [65], mas o método mais tradicional e considerado padrão dos ensaios é a câmara de pressão de Richards (1949) [64].

A câmara de pressão de Richards (Figura 2-24) indica a quantidade de água relacionada a uma tensão de sucção imposta na amostra de solo através da diferença de peso [66]. A sucção é dada por meio da diferença de potencial entre os materiais e o fluxo de água é reduzido conforme o potencial matricial torna-se menor, até que se atinja o equilíbrio de umidade do provete [67].

Para a realização do ensaio, utiliza-se de uma placa porosa (cerâmica) sobre uma amostra de solo úmido e desaerado, assim como a placa, que será dessaturado até atingir o equilíbrio com a placa. Os materiais são dispostos dentro de câmaras herméticas, providas de um sistema de drenagem, sob ação de uma força de compressores controlados por reguladores de pressão e manômetros. O equilíbrio é alcançado quando a drenagem entre os materiais cessa e, então, o conteúdo da água é estimado por pesagem [68]. Este método apresenta algumas desvantagens, como o elevado custo do equipamento, tempo necessário para equilíbrio entre umidade e tensão aplicada, problemas de contato hidráulico entre a placa porosa e a amostra, além de não reproduzir bem as condições *in situ*.

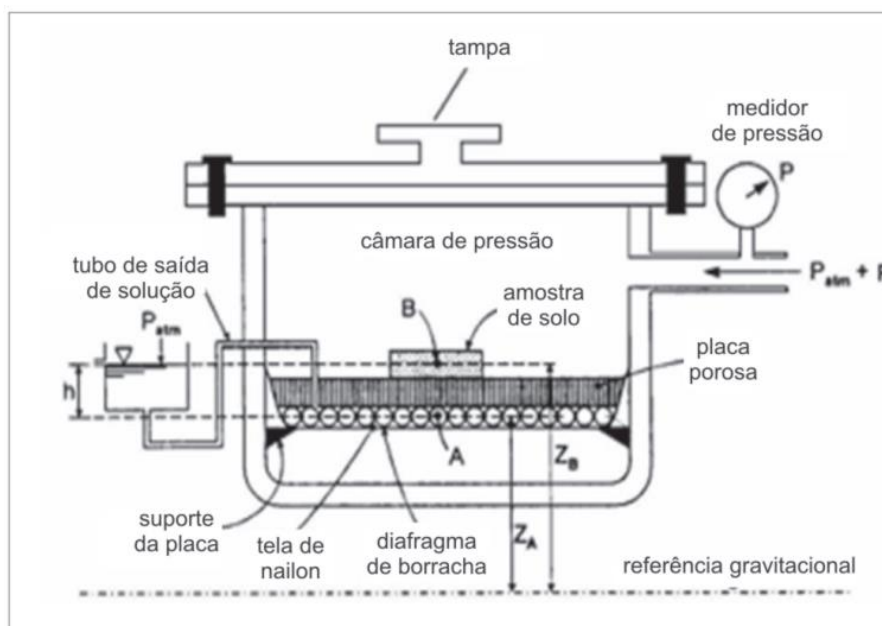


Figura 2-24: Câmara de pressão de Richards

Fonte: [69]

Na busca por métodos que pudessem extrair leituras e, então, obter a curva característica mais rápida, mais recentemente surgiu o equipamento eletrônico chamado psicrômetro WP4 (*Dewpoint Potential Meter*) (Figura 2-25). A detecção da amostra deformada de solo é feita em até 5 minutos, por meio de uma célula fotodetectora que identifica alteração do espelho interno do dispositivo após a condensação da água [54].

O equipamento conta com um sensor que permite regular a temperatura interna de ensaio e mede o potencial de água retida no solo enquanto ocorre o equilíbrio entre as pressões de saturação do solo e do ar presente na câmara de leitura [56]. As desvantagens obtidas pelo método são a baixa precisão e variação conforme a temperatura ambiente, além de permitir trabalhar somente com amostras deformadas e a generalização do volume de água na amostra.

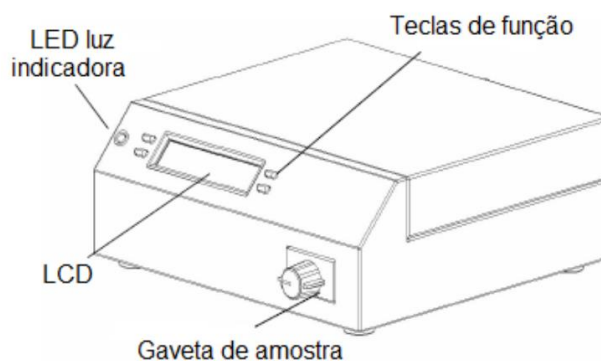


Figura 2-25: Psicrômetro WP4-T

Fonte: [54]

2.5.3 Ajuste da curva de retenção

O ajuste da curva de retenção é motivo de diversas pesquisas. Autores, como Brooks e Corey (1964), Van Genuchten (1980), Van Genuchten (1980) – Mualem (1976), sugerem diferentes modelos [41]. Previamente, tem-se o conhecimento de uma curva de retenção de água típica (Figura 2-26), em que no eixo horizontal está representada a sucção total e no eixo vertical o teor em água volumétrico.

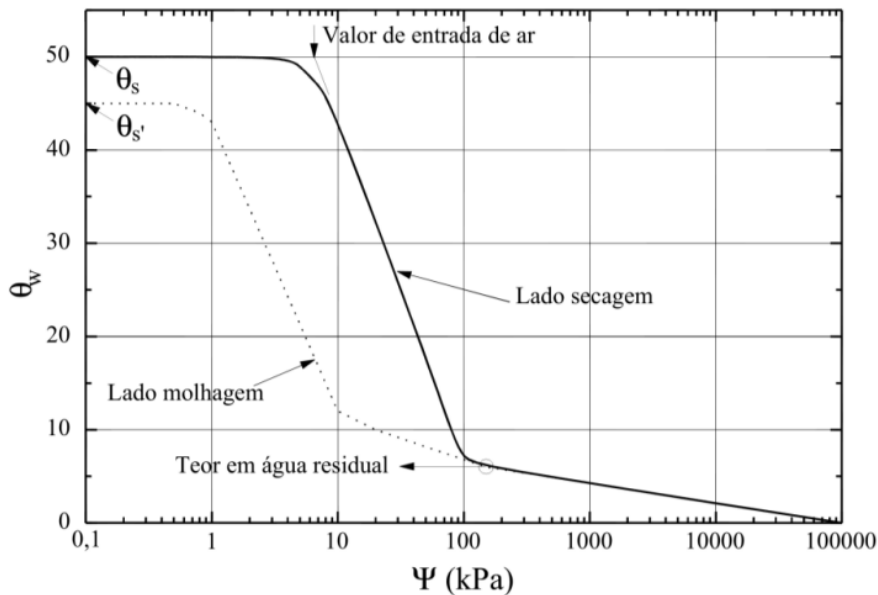


Figura 2-26: Curva de retenção de água típica um solo

Fonte: [5]

A curva de retenção proposta por Fredlund e Xing (1994) [41] é descrita pela (Equação 2-21).

$$w = C(\psi) \frac{w_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (2-21)$$

Onde,

w = teor de umidade (%);

ψ = sucção (kPa);

$C(\psi)$ = fator corretivo para forçar uma sucção de 10^6 quando o teor em água é nulo;

w_s = teor de umidade do solo saturado (%);

a = parâmetro de ajuste indicativo do valor de entrada de ar;

n = parâmetro de ajuste relacionado com o declive da curva de retenção;

m = parâmetro de ajuste relacionado com a curvatura próxima do teor de umidade residual.

O fator corretivo é dado pela expressão a seguir (Equação 2-22).

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \frac{\psi}{\psi_r})}{\ln(1 + \frac{10^6}{\psi_r})} \quad (2-22)$$

Onde,

ψ = sucção (kPa);

ψ_r = sucção correspondente ao teor de umidade residual, θ_r (kPa).

2.6 Método do papel filtro

Dada a importância de realizar a análise da curva de umidade característica do solo relacionando a quantidade de fluido presente no material e a sucção, existem diversas técnicas que possibilitam associar os parâmetros. A metodologia mais usual é a câmara de pressão de Richards, todavia apresenta adversidades para sua aplicação, implicando em maior custo e tempo despendido [70]. Assim sendo, outras alternativas para a obtenção da curva foram desenvolvidas, como o método do papel-filtro.

2.6.1 Contexto histórico

Em 1916, o pesquisador Shull notou que era possível usar a absorção como forma de medição de poder de sucção por meio de sementes selecionadas. O objetivo era mensurar a força com a qual as partículas de solo, de distinta granulometria, retêm a umidade em diferente grau de secura, relacionando a pressão de vapor com a sucção [51]. Pouco depois, Hansen (1926), realizou o mesmo procedimento, mas utilizando papéis filtro com solução açucarada e pressão de vapor previamente definida. Dessa forma, o comportamento da solução serviu como referência do método, não sendo necessária a realização da calibração [50].

Mais recente, em 1937, Gardner passou a adotar o papel filtro como objeto absorvente, permitindo que os testes se tornassem mais confiáveis devido ao processo industrial pelo qual o elemento é submetido, garantindo a padronização das características do material [50].

As vantagens para a utilização do método do papel filtro são muitas, especialmente por se tratar de uma alternativa simples e barata, podendo ser aplicada tanto em laboratório quanto em campo. A técnica exigida pode ser desempenhada por meio de treinamentos básicos de laboratório e num curto prazo comparado a outros ensaios. O modelo permite analisar amostras com grandes variações de sucção e apresenta precisão relevante [48]. Além disso, o método permite testar o solo em condições similares ao solo in situ [51].

2.6.2 Fundamentos do papel filtro

O método do papel filtro corresponde a um exemplo indireto de medir a sucção e sua forma básica de funcionamento é a troca de água entre o solo e o elemento. Ou seja, o princípio do modelo é estabelecer equilíbrio de sucção entre dois materiais quando expostos em um

ambiente fechado [51]. O fluxo capilar acontece entre os poros do solo e as fibras do filtro de papel, contudo, ainda que o equilíbrio de sucção tenha se alcançado, o teor de umidade de ambos os materiais podem ser diferentes entre si.

O autor Marinho [50] ainda acrescenta que o tempo de equilíbrio para a medição correta é importante e que a preparação do material para a realização do procedimento deve ser rigorosa, para que as características de absorção do filtro não sejam prejudicadas. Outras interferências como variação de temperatura, exposição ao ambiente, manuseio e irregularidades superficiais ou descontinuidades atuam sobre os resultados, compondo o grupo de influências que necessitam de atenção de modo a minimizar seus efeitos sobre o ensaio [70].

A metodologia pode ocorrer de duas maneiras distintas: fluxo capilar – medição de sucção matricial – e fluxo de vapor – medição de sucção total – (Figura 2-27). A primeira corresponde ao elemento de ensaio diretamente em contato com o papel filtro, permitindo que o fluxo de sucção da água seja realizado ainda no estado líquido. Já o segundo, refere-se à transferência de umidade por meio do vapor de água, no qual as gotículas superam as forças capilares e osmóticas entre os materiais. Nessa situação, observa-se a necessidade da presença de um espaçamento entre o papel filtro e o solo [51].

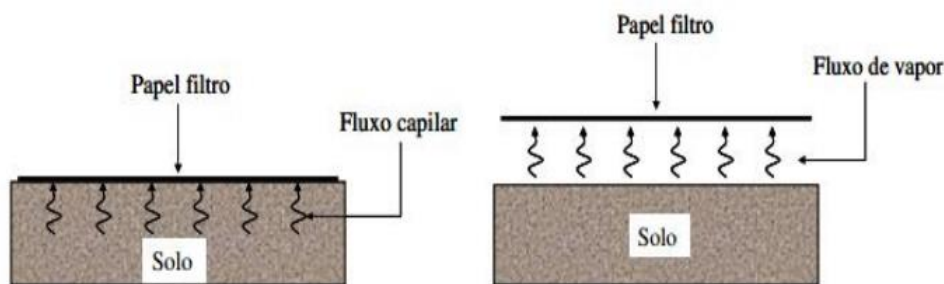


Figura 2-27: Tipos de fluxo entre o material e o papel filtro
Fonte: [52]

Nesse contexto, o papel filtro corresponde ao objeto seco no experimento, o qual absorverá a água da substância ensaiada. Além disso, os modelos de papel filtro habitualmente utilizados são Whatman nº 42 e o Schleider & Schuell nº 589, padronizados pela ASTM D 5298 (2003) e de calibração conhecida [52].

2.6.3 Funcionamento do papel filtro

O procedimento consiste em colocar um solo úmido em contato com um material poroso (papel filtro) durante um período de tempo suficiente para que o equilíbrio de sucções entre a amostra molhada e o papel filtro seja estabelecido e o fluxo de água seja cessado [48]. A água do solo é transferida para o material poroso por capilaridade e, mesmo que a amostra e o papel filtro apresentem umidades diferentes, o estado de equilíbrio é definido pela igualdade de potenciais matriciais (ψ_m) [70].

O pesquisador Fredlund [41] recomenda, primeiramente, secar em forno o papel filtro antes e, em seguida, aguardar ser resfriado em ambiente isolado antes de sua utilização. Inicialmente,

os corpos de provas são submetidos a diferentes umidades e devem permanecer, em isolamento num recipiente, em contato a água (quantidade pré-estabelecida de umidade) até que o teor de umidade seja uniforme entre os grãos, em condições ambientes de temperatura e pressão [52].

As amostras umedecidas de solo são moldadas em formato de anel e posicionadas diretamente em contato com três papéis de filtro empilhados. Os papéis de filtro externos são usados para a proteção contra a contaminação do papel de filtro central que é usado para a medição da sucção [41]. Sugere-se envolver os provetes com a amostra de solo e o papel filtro com ao menos três camadas de filme plástico aderente para selar. Por fim, mantém-se o provete em isolamento num recipiente fechado e com temperatura controlada, protegendo-o das condições externas, até que se atinja o equilíbrio de sucção [51].

O tempo necessário para atingir a sucção de equilíbrio sugerido pela norma americana ASTM D 5298 (2003) [71] é de 7 dias, todavia, ressalta também que este depende das condições ambientes como a umidade relativa do ar, a massa de solo e o espaço de armazenamento. Segundo Cupertino [51], há autores que indicam variar o tempo de equilíbrio de acordo com o número de papéis utilizados, como também existem aqueles que recomendam o uso de um único papel filtro, considerando o erro de longos períodos de sucção maior do que o erro devido a aderência do solo úmido ao papel filtro. Ainda, em seus estudos, verificou-se que a capacidade de retenção da água do solo diminui com o aumento da temperatura.

Ao final do período de teste, o papel filtro é separado da amostra rapidamente com uma pinça e, finalmente, mede-se massa úmida do material absorvente. O teor de umidade do papel filtro é obtido por meio da diferença entre sua massa seca e úmida. Em seguida, o valor de sucção do solo é encontrado pela relação entre a sucção (ψ) e a umidade (w) do material poroso, através curva de calibração de acordo com o modelo do papel filtro [48].

2.6.4 Curvas de calibração do papel filtro

Embora existam vários modelos de papéis de filtro, os papéis comumente utilizados são Whatman nº 42 e o Schleider & Schuell nº 589, por apresentarem calibrações conhecidas e confiança no mercado. A curva de calibração é obtida relacionando a força de pressão de sucção do papel de filtro com o teor de umidade do próprio material.

A norma ASTM D 5298 (2003) [71] detalha o procedimento de calibração da curva de sucção do papel filtro utilizando uma solução salina conhecida (cloreto de potássio ou cloreto de sódio) com água destilada. A sucção ocorre após o contato do material com a solução e o conjunto – papel de filtro e solução salina – deve estar isolado num recipiente inerte (plástico ou aço inoxidável). O valor da força de pressão de sucção é obtido por meio da umidade relativa do ar em relação à solução salina (Equação 2-21).

$$\psi = \frac{R.T}{V} \ln R_h \quad (2-23)$$

Onde,

ψ = sucção (kPa);

R = constante universal do gás ideal (8,31432 m³.Pa/mol.K);

T = temperatura absoluta (K);

V = volume de 1000 mols de água líquida (0,018 m³);

R_h = umidade relativa (Tabela 2-3).

Tabela 2-3: Concentrações de solução salina para avaliação da sucção do solo

kPa	log kPa	pF	atm	R_h	20°C	
					g NaCl	g KCl
					1000 mL water	1000 mL water
-98	1.99	3.0	-0.97	0.99927	1.3	1.7
-310	2.49	3.5	-3.02	0.99774	3.8	5.3
-980	2.99	4.0	-9.68	0.99278	13.1	17.0
-3099	3.49	4.5	-30.19	0.97764	39.0	52.7
-9800	3.99	5.0	-96.77	0.93008	122.5	165.0

Fonte: [71]

O procedimento para encontrar o teor em água do filtro de papel é sequenciado pela aferição de sua massa inicial seca e sua massa umedecida (Equação 2-22 e Equação 2-23).

$$m_{pf,s} = m_2 - m_h \quad (2-24)$$

$$m_{w,pf} = m_1 - m_2 + m_h - m_c \quad (2-25)$$

Onde,

$m_{pf,s}$ = massa do papel filtro seco (g);

m_2 = massa total seca (g);

$m_{w,pf}$ = massa de água no papel filtro (g);

m_1 = massa total úmida (g);

m_h = massa do recipiente quente (g);

m_c = massa do recipiente frio (g).

O teor de umidade ou teor em água de cada filtro de papel é dado pela expressão a seguir (Equação 2-24).

$$w_{pf} = \frac{m_{w,pf}}{m_{pf,s}} \times 100 \quad (2-26)$$

Onde,

w_{pf} = teor de água do papel filtro (%).

Em geral, a curva de calibração é composta por duas equações, que correspondem às respostas do papel filtro submetido a altos e a baixos níveis de sucção [72]. O modelo inicialmente

utilizado para a determinação da equação de calibração apresenta, comumente, a estrutura a seguir (Equação 2-25) [51].

$$\log_{10} \psi = a - b \cdot w_{pf} \quad (2-27)$$

Onde,

a = constante de inclinação da curva de calibração do papel filtro (\log_{10} kPa/%);

b = constante de interceptação da calibração do papel filtro (\log_{10} kPa);

w_{pf} = teor de umidade do papel filtro (%).

A norma americana trata da curva de calibração como a combinação das curvas de umedecimento e de secagem do papel de filtro, assim como muitos autores, a exemplo de Chandler et al. (1992), Crilly e Chandler (1993), Leong et al. (2002) e Marinho & Oliveira (2006), acordam que a curva de sucção do papel de filtro (Figura 2-28) apresenta aspecto bilinear com um ponto de inflexão [72]. Ainda, há autores, como Marinho & Oliveira (2006), que resumem a sucção total como sendo a sucção matricial, determinada por meio do modelo do papel de filtro e sua correspondente calibração [50].

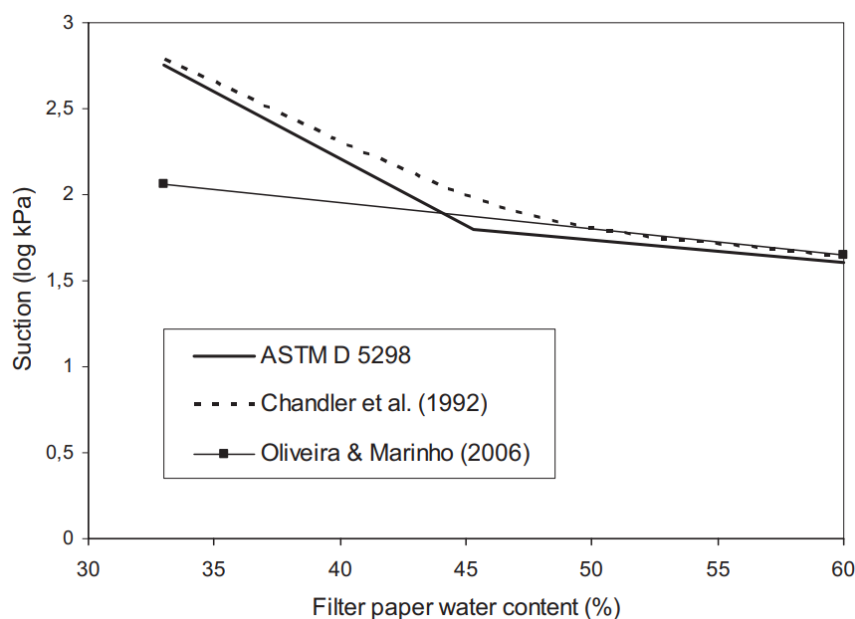


Figura 2-28: Curvas de calibração para o papel filtro W42

Fonte: [72]

Embora a norma ASTM D 5298 (2003) [71] sugira duas equações correspondentes à curva de calibração, existem diversas literaturas utilizadas (Tabela 2-4) para estimar sucção matricial em solos não saturados para o método do papel filtro [48]. Além disso, há publicações disponíveis em que a calibração é feita por meio da molhagem, com o uso do papel filtro naturalmente seco ainda no início do ensaio [72].

Tabela 2-4: Curvas de calibração para papel filtro

Referência	Sucção	Intervalo de umidade – w (%)	Curvas de calibração (kPa)
a) Whatman nº 42 – Filter Paper			
Fawcett e Collis-George (1967)	Não definido	$w < 45,3$	$\log_{10}(\psi) = 5,327 - 0,0779w$
Hamblin (1981)	Não definido	Não definido	$\log_{10}(\psi) = 6,281 - 0,0822w$
Chandler e Gutierrez (1986)	Matricial	Não definido	$\log_{10}(\psi) = 5,85 - 0,0622w$
Greacen et al. (1987)	Não definido	$w < 45,3$	$\log_{10}(\psi) = 5,327 - 0,0779 \log(w)$
Chandler et al. (1992)	Matricial	$w \leq 47$	$\log_{10}(\psi) = 4,84 - 0,0622w$
		$w \geq 47$	$\log_{10}(\psi) = 6,05 - 2,48 \log(w)$
Crilly e Chandler (1993)	Não definido	$15 \leq w \leq 47$	$\log_{10}(\psi) = 4,84 - 0,0622w$
		$w > 47$	$\log_{10}(\psi) = 6,05 - 2,48 \log(w)$
Leong et al. (2002)	Matricial	$w < 47$	$\log_{10}(\psi) = 4,945 - 0,0673w$
		$w \geq 47$	$\log_{10}(\psi) = 2,909 - 0,0229w$
Leong et al. (2002)	Total	$w < 26$	$\log_{10}(\psi) = 5,31 - 0,0879w$
		$w \geq 26$	$\log_{10}(\psi) = 8,779 - 0,222w$
ASTM D 5298 (2003)	Total e Matricial	$w < 45,3$	$\log_{10}(\psi) = 5,327 - 0,0779w$
		$w > 45,3$	$\log_{10}(\psi) = 2,412 - 0,0135w$
Oliveira & Marinho (2006)	Total e Matricial	$w < 33$	$\log_{10}(\psi) = 4,83 - 0,0839w$
		$w > 3$	$\log_{10}(\psi) = 2,57 - 0,0154w$
b) Schleider & Schuell nº 589 – Filter Paper			
McQueen e Miller (1968)	Não definido	$w < 54$	$\log_{10}(\psi) = 5,238 - 0,0723 \log(w)$
		$w \geq 26$	$\log_{10}(\psi) = 1,8966 - 0,01025 \log(w)$
Al-Khafaf e Hanks (1974)	Não definido	$w < 85$	$\log_{10}(\psi) = 4,136 - 0,0337 \log(w)$
		$w \geq 85$	$\log_{10}(\psi) = 2,0021 - 0,009 \log(w)$
McKeen (1980)	Não definido	$w < 66$	$\log_{10}(\psi) = 4,9 - 0,0624 \log(w)$
		$w \geq 66$	$\log_{10}(\psi) = 1,25 - 0,0069 \log(w)$
Greacen et al. (1987)	Não definido	$w < 54$	$\log_{10}(\psi) = 5,056 - 0,0688 \log(w)$
ASTM (1997)	Não definido	$w \geq 54$	$\log_{10}(\psi) = 1,882 - 0,0102 \log(w)$

Fonte: Adaptado de [51], [41] e [72]

3. Metodologia

3.1 Introdução

Os ensaios foram realizados, individualmente através da caracterização de cada material utilizado, recorrendo às normativas e aos procedimentos apresentados no capítulo 2, dando importância ao estudo exibido anteriormente.

O primeiro material de estudo, caracterizado como pó de pedra, é resultante do processo de britagem de pedra branca de granito. A fim de facilitar a leitura, deu-se o nome ao material de amostra de Pó de Pedra ou simplesmente PP (Figura 3-1), o qual apresenta aspecto similar ao pó de gesso, de cor branca e textura fina.

Já o segundo e o terceiro material de estudo tratam-se de subprodutos do processo de mineração em que o jazigo de extração se estende ao sul da Península Ibérica. Além disso, os depósitos de minerais formados pela rocha bruta da região estão armazenados em minas subterrâneas e são classificados como vulcano-sedimentares de sulforetos maciços correspondendo à metais como cobre, zinco e chumbo. Ressalta-se que os dois materiais, apesar de mesma origem, são de minas de extração diferentes entre si. O primeiro material, que apresenta coloração acinzentada escura e textura fina, foi denominado como RJ1 – Rejeitos de Mineração 1 (Figura 3-2) – e recolhido em novembro de 2019. O segundo material que foi nomeado como RJ2 – Rejeitos de Mineração 2 (Figura 3-3)– apresenta coloração acinzentada e textura fina, assim como RJ1, todavia possui tons mais claros que o primeiro.



Figura 3-1: PP
Fonte: da Autora (2022)



Figura 3-2: RJ1
Fonte: da Autora (2022)



Figura 3-3: RJ2
Fonte: da Autora (2022)

Os três materiais foram fornecidos pela instituição. O PP foi utilizado como modelo de calibração dos métodos, devido ao nível de toxicidade, como presença de óxidos e químicos, dos materiais RJ1 e RJ2.

Em observância às necessidades de desenvolver uma pesquisa sobre os rejeitos de mineração e avaliar suas propriedades, os ensaios foram realizados através da caracterização do material, conforme os estudos apresentados em 2.4, 2.5 e 2.6, seguindo às normas vigentes nacionais e internacionais.

3.2 Ensaio de densidade de partículas sólidas

Os ensaios de determinação da densidade dos grãos foram realizados conforme a norma ISO/TS 17892-3 (2004) [18] descreve para os 3 materiais (Figura 3-4). Dessa forma, o procedimento foi dividido em quatro etapas: calibração dos picnômetros, ensaio do pó de pedra, ensaio dos rejeitos de mineração 1 e ensaio dos rejeitos de mineração 2.



Figura 3-4: Densidade dos grãos com o material RJ2
Fonte: da Autora (2022)

Os materiais utilizados para o desenvolvimento do ensaio foram três picnômetros limpos e secos com volume de 100 ml, um termômetro, bomba de sucção de ar, estufa de secagem, líquido de controle (água destilada), papel de absorção, uma balança de ultra precisão com aproximação de 0,0001 g, além das amostras dos materiais de estudo (PP, RJ1 e RJ2).

O primeiro procedimento realizado foi calibrar os picnômetros selecionados para os ensaios, para isso, se obteve a massa dos picnômetros limpos, secos e vazios. Preencheu-se o bulbo, cautelosamente, com água destilada sem a presença de ar, colocou-se o tubo (ou pescoço) do picnômetro sobre o bulbo, removeu-se o excesso de água destilada, com o auxílio de um papel absorvente, até a marca de medição de 100 ml e coletou-se a massa do conjunto picnômetro e água destilada. Ao final, verificou-se a temperatura ambiente e os picnômetros foram secos novamente.

Inicialmente, as amostras foram secas em estufa a 105 °C, separadas em três porções de aproximadamente 20 g para cada material e adicionadas ao picnômetro vazio. Recolheu-se as massas totais, tanto do picnômetro seco e vazio quanto do picnômetro com a amostra. Em seguida, acrescentou, ao bulbo do picnômetro com a amostra, água destilada. Misturou-se, cuidadosamente, até que a mistura se apresentasse homogênea e, então, o conteúdo foi submetido à bomba vácuo (Figura 3-5) durante 30 minutos para a remoção de ar.

Posteriormente, completou-se o bulbo do picnômetro com amostra saturada e água destilada de modo que ficasse totalmente preenchido e sem bolhas de ar. Seguidamente, colocou-se o tubo superior de medição sobre o bulbo preenchendo a seção de medição. Cautelosamente, removeu-se o excesso de água com um rolinho de papel absorvente até a marca de 100 ml do tubo do picnômetro. Por fim, aferiu-se a massa do conjunto (amostra, água destilada e picnômetro) (Figura 3-6) com balança de ultra precisão e a temperatura de ensaio com o auxílio de um termômetro.



Figura 3-5: Provetes submetidos a bomba de vácuo
Fonte: da Autora (2022)



Figura 3-6: Aferição da massa do picnômetro com material PP
Fonte: da Autora (2022)

Ao final do ensaio, a densidade da água destilada foi corrigida, de acordo com a temperatura de ensaio, por meio de interpolação de dados com o auxílio do Quadro 2-1 e os cálculos foram desenvolvidos conforme apresentado em 2.4.1, seguindo a normativa correspondente ao ensaio.

Para cada material, aferiu-se três provetes e a densidade dos grãos, nesse caso, foi determinada pela média aritmética entre as três densidades obtidas.

3.3 Ensaio de granulometria

A metodologia utilizada para a determinação granulométrica dos materiais seguiu a norma ISO/TS 17892-4 (2004) [22]. O processo foi dividido em duas etapas: peneiração e sedimentação. Além disso, para cada etapa o procedimento foi realizado três vezes, correspondendo a cada um dos materiais de estudo.

3.3.1 Ensaio de peneiração

A etapa de peneiração foi realizada utilizando uma balança de ultra precisão com aproximação de 0,0001 g, estufa de secagem, becker com capacidade de 800 ml, proveta com capacidade de 100 ml, aparelho dispersor automático (Figura 3-10), agente dispersante (solução de hexametáfosfato de sódio), almofariz e mão de grau, colher, bandejas resistentes à corrosão, cápsulas metálicas, peneira da série grossa com abertura nominal da malha com dimensão de 2,0 mm e as peneiras da série fina com abertura nominal da malha de 1,0 mm, 500 μm , 250 μm , 125 μm e 63 μm , escovas de peneiras, além das amostras de estudo. As peneiras de teste correspondem a norma vigente CEN ISO/TS 17982-4 [22].

Inicialmente, a amostra deve ser preparada. A quantia de material selecionada para o desenvolvimento do ensaio precisa condizer com a quantidade, em massa, de acordo com a partícula D90 – menor abertura da malha da peneira em que, através dela, 90% ou mais partículas passarão. Essa quantia é definida por meio do Quadro 3-1.

Quadro 3-1: Massa mínima necessária para peneiramento em função da partícula D90

Diâmetro da partícula D ₉₀ (mm)	Massa mínima necessária para peneirar (g)
0,5	50
1,0	100
4,0	150
6,0	350
8,0	600
16,0	2500
22,4	5000
31,5	10000
45,0	20000
63,0	40000
75,0	56000

Fonte: Adaptado [22]

Nesse caso foram selecionados 150 g de cada material, pois visualmente nota-se que os insumos são compostos majoritariamente por partículas finas. Além disso, se a amostra de estudo apresentar características com mais de 10% de finos, ou seja, material passante pela peneira de 63 μm , é necessário realizar o ensaio com a amostra úmida.

Na sequência, as amostras úmidas foram preparadas. Primeiramente, utilizou-se de um recipiente cônico metálico para armazenamento do material, então adicionou-se 100 ml de solução de hexametáfosfato de sódio com concentração de 2 g/l e 100 ml de água destilada, com auxílio da proveta graduada. O conjunto de amostra, solução e água destilada foi levado ao aparelho dispersor mecânico durante 20 minutos, após o período, o material permaneceu por 40 minutos no recipiente que pouco a pouco foi agitado.

A mistura foi lavada na peneira de 2 mm aninhada na peneira 0,063 mm até se observar escorrer somente água. O material escorrido além da peneira 63 μm foi reservado numa forma metálica e o material retido nas peneiras foi levado à estufa de secagem a 105 °C.

Ao final da secagem, a amostra passou pelo procedimento de peneiração, com o auxílio do agitador mecânico (Figura 3-7) durante 10 minutos. Neste caso, utilizou-se apenas das peneiras (250 μm , 125 μm e 63 μm) correspondentes à série fina, pois não foi retido grãos da série grossa.

O equipamento de esquarteramento (Figura 3-8) não foi necessário utilizar, considerando que a amostra ensaiada apresentava pouca presença de materiais finos acima de 63 μm .



Figura 3-7: Agitador mecânico
Fonte: da Autora (2022)



Figura 3-8: Equipamento Riffling ou esquarteramento
Fonte: da Autora (2022)

Ao final do ensaio, aferiu-se a massa do material retido em cada peneira. Os cálculos foram realizados conforme apresentado em 2.4.3.1, seguindo as orientações da normativa utilizada.

3.3.2 Ensaio de sedimentação

O ensaio foi desenvolvido utilizando uma peneira de abertura nominal 63 μm , um termômetro, um cronômetro, cápsulas de alumínio, almofariz e mão de grau, três provetas de vidro graduadas e calibradas com volume de 1000 ml, proveta com capacidade de 100 ml, aparelho dispersor automático, defloculante (solução de hexametáfosfato de sódio), um densímetro combo simétrico calibrado, uma balança de ultra precisão com aproximação de 0,0001 g, líquido de controle (água destilada), estufa de secagem, becker com capacidade de 800 ml e as amostras de estudo (PP, RJ1 e RJ2) (Figura 3-9 e Figura 3-10). Outros materiais como luvas de latex, filme plástico aderente e filtro de papel foram utilizados para auxiliar no seguimento do ensaio.

Previamente, verificou-se a calibração do densímetro combo simétrico e da proveta graduada.



Figura 3-9: Materiais utilizados para o ensaio de sedimentação
Fonte: da Autora (2022)



Figura 3-10: Aparelho dispersor automático
Fonte: da Autora (2022)

Então, preencheu-se o becker com 800 ml de água destilada e a proveta com 100 ml de solução de hexametáfosfato de sódio com concentração de 40 g/l. Separou-se 50 g de cada material para o ensaio, conforme o Quadro 3-2, seguindo a classificação de solos coesivos, com pouca ou nenhuma areia. Outra parcela do material foi separada em cápsula de alumínio para a recolha do teor de umidade, pesou-se e levou-se à estufa de secagem ligada a 105 °C.

Quadro 3-2: Massa seca do corpo de prova de solo para teste de sedimentação

Tipo de solo	Massa seca do solo (g)
Solo contendo areia	até 75
Solos coesivos, com pouca ou nenhuma areia	30 a 50
Muito plástico para argilas plásticas	10 a 30

Fonte: Adaptado [22]

A amostra separada (50 g) foi colocada no frasco cônico do aparelho dispersor junto de 100 ml de solução dispersante que misturou o conjunto durante 20 minutos. Após o período de agitação, o conjunto foi lavado, cuidadosamente, com 900 ml de água destilada sobre a peneira de 63 μm e o material passante foi adicionado à proveta graduada de 1000 ml, de modo a atingir a marca referencial. Em seguida, cobriu-se o tubo com um filtro de papel para que nenhuma substância do ar caísse sobre a amostra que permaneceu em repouso por aproximadamente 18 horas.

Ao final do período de repouso, removeu-se o papel filtro do topo da suspensão e isolou-se a superfície com duas camadas de filme plástico aderente e uma luva de latex, então agitou-se a mistura durante 2 minutos, até que se apresentasse homogênea. Coloca-se sobre a bancada livre de movimentações, remove-se as camadas de isolamento do topo e a partir disso aciona-se o cronômetro.

O densímetro deve ser inserido na suspensão para que flutue livremente e, então, as leituras de ensaio são realizadas. O termômetro também é operado de modo a controlar a temperatura de ensaio que deve ser constante entre 15 e 25 °C. A Figura 3-11 retrata o densímetro e o termômetro submersos para as leituras.



Figura 3-11: Aferição de densidade e temperatura da amostra PP
Fonte: da Autora (2022)

Um cilindro de sedimentação deve ser preparado com 100 ml de solução dispersante (hexametáfosfato de sódio) e com 900 ml de água destilada para controle e correção da densidade referente ao impacto da solução dispersante junto à amostra de ensaio.

A leituras do ensaio (densímetro) devem ser feitas nos tempos adequados de 30 s, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 60 min, 2 h, 8 h, 24 h e 48 h. Para cada leitura é necessário inserir e remover lentamente o densímetro e enxaguá-lo para colocar na solução de referência. A temperatura de suspensão deve ser registrada nos primeiros 15 minutos e depois a cada leitura. As figuras (Figura 3-12, Figura 3-13, Figura 3-14) a seguir demonstram 3 etapas do ensaio de sedimentação ao longo de 48 horas de ensaio.

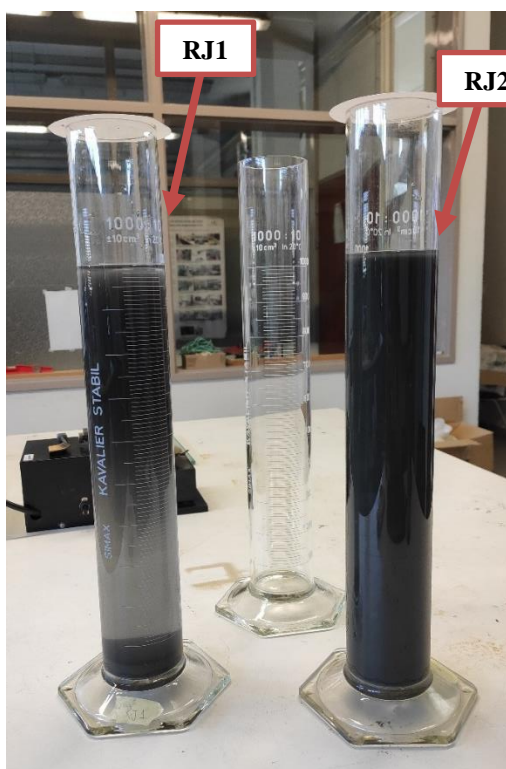


Figura 3-12: Sedimentação em menos de 24 horas com RJ1 e RJ2
Fonte: da Autora (2022)

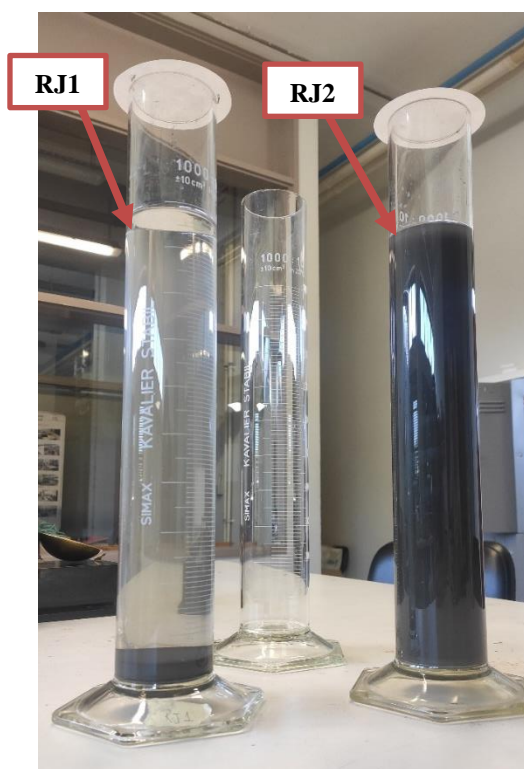


Figura 3-13: Sedimentação após 24 horas com RJ1 e RJ2
Fonte: da Autora (2022)

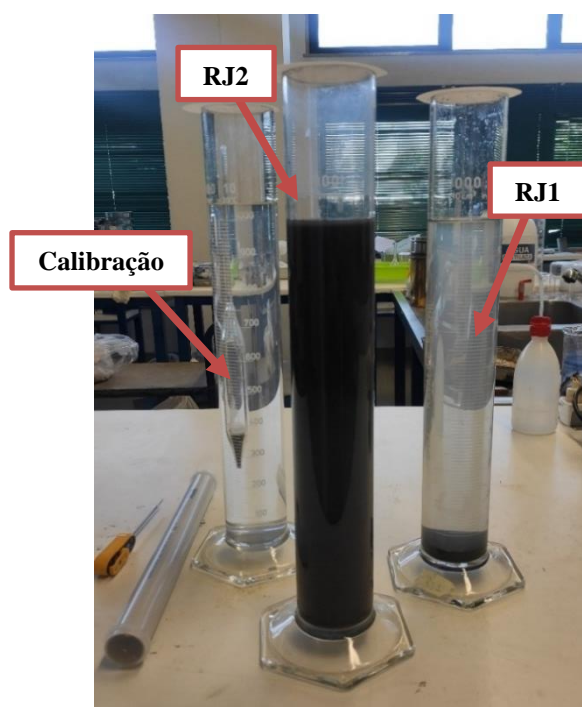


Figura 3-14: Sedimentação após 48 horas com RJ1 e RJ2
Fonte: da Autora (2022)

Ao final do ensaio, a leitura do hidrômetro foi corrigida, de acordo com a temperatura de ensaio, com o auxílio do Quadro 2-3 e os cálculos foram realizados conforme apresentado em 2.4.3.2, para o método de sedimentação do hidrômetro, seguindo as orientações da normativa utilizada. O valor de densidade utilizado no ensaio de sedimentação foi obtido pelo procedimento descrito em 3.2.

3.3.3 Curva granulométrica

A análise granulométrica, como apresentado anteriormente, é realizada pela união dos ensaios de peneiração – frações maiores de grãos – e sedimentação – partículas finas. Os resultados obtidos são combinados num único gráfico.

As percentagens passantes de material estimadas para cada diâmetro equivalente são distribuídas num diagrama que relaciona a abertura da malha (diâmetro das partículas) e o percentual de material que passa pela peneira – eixo das ordenadas – definindo, portanto, a curva granulométrica do material (Figura 3-15).

O objetivo é obter uma curva contínua e suave, então, se houver descontinuidade entre as curvas de peneiramento e de sedimentação, prioriza-se os dados resultantes do peneiramento. Além disso, alternativamente, os resultados dos testes podem ser arredondados para o 1% mais próximo.

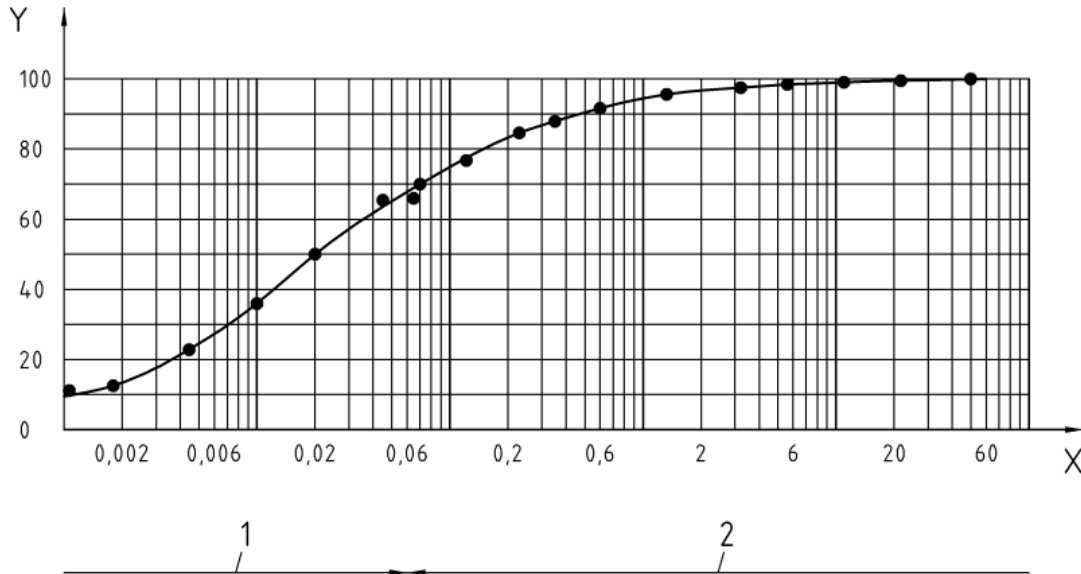


Figura 3-15: Distribuição de tamanho de partícula
Fonte: [22]

Em que os indicadores correspondem a:

- 1 – Sedimentação;
- 2 – Peneiramento;
- X – Tamanho da partícula (mm);
- Y – Porcentagem passante de grãos.

3.4 Ensaio de limites de consistência

Os ensaios para a determinação dos limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade) foram realizados conforme a norma portuguesa NP-143 (1969) [36]. Para cada um dos limites têm-se uma metodologia, dessa forma, a atividade foi dividida em duas etapas distintas. Além disso, para cada etapa o procedimento foi realizado três vezes, correspondendo a cada um dos materiais de estudo.

3.4.1 Ensaio de limite de liquidez

A técnica foi realizada utilizando uma espátula, recipiente de mistura, quatro cápsulas metálicas, uma peneira de abertura nominal 420 μm , conjunto de almofariz e mão de grau, estufa de secagem, uma balança de ultra precisão com aproximação de 0,0001 g, água destilada, concha de Casagrande, um riscador (cinzel) e amostra dos materiais (PP, RJ1 e RJ2).

Os primeiros procedimentos realizados foram a calibração do aparelho de Casagrande para que cumprisse com 30 golpes em 15 segundo e o destorroamento de material, utilizando almofariz e mão de grau. Passa-se 500 g de amostra na peneira de 420 μm e separa-se 100 g de material passante. Mistura-se o provete com água destilada, que deve ser adicionada pouco a pouco e

amassada com a espátula, dentro do recipiente de mistura durante 5 minutos, até que se forme uma pasta homogênea e consistente.

A pasta é colocada na concha de Casagrande suficientemente para que cubra uma camada com espessura de 1 cm e sua superfície é nivelada (Figura 3-16). Em seguida, faz-se uma ranhura no centro da pasta deslocando o cinzel diametralmente à concha (Figura 3-17). Aciona-se a manivela para que se inicie os golpes até que a fenda se feche numa extensão de aproximadamente 1 cm. Anota-se o número de pancadas correspondentes ao provete e retira-se, com a espátula, cerca de 10 g de amostra onde a ranhura se fechou para a determinação do teor de umidade e coloca-a na cápsula metálica. Leva-se o provete à estufa de secagem com temperatura ajustada de 105 °C.



Figura 3-16: Preenchimento da concha de Casagrande com o material RJ1
Fonte: da Autora (2022)



Figura 3-17: Ranhura no centro da concha sobre a pasta de RJ1
Fonte: da Autora (2022)

O material restante na concha é devolvido ao recipiente de mistura e, novamente, o procedimento é realizado com a adição de mais água à mistura. O processo é realizado 4 vezes, tornando a pasta cada vez mais fluída.

O objetivo é definir os teores de umidade dos provetes dos quatro testes, de modo que o número de pancadas varie entre 10 e 40 golpes. Além disso, espera-se que dois deles resultem abaixo de 25 golpes e dois deles acima de 25 golpes.

O limite de liquidez (expresso em porcentagem arredondado) é dado pelo teor de umidade correspondente a 25 golpes, obtido pela interpolação entre os resultados do diagrama traçado que relaciona o teor em água (escala aritmética – ordenada) em cada provete correspondente ao

número de pancadas (escala logarítmica – abcissa). O material é considerado não plástico quando não é possível realizar o ensaio.

3.4.2 Ensaio de limite de plasticidade

Os materiais utilizados para a realização do ensaio foram quatro cápsulas metálicas, estufa de secagem, um recipiente de mistura, uma espátula, água destilada, conjunto de almofariz e mão de grau, uma peneira de abertura nominal 420 μm , uma balança de ultra precisão com aproximação de 0,0001 g, uma placa de vidro plana e amostra dos materiais (PP, RJ1 e RJ2).

Inicialmente, realiza-se o destorroamento do material utilizando o almofariz e mão de grau, a seguir, peneira-se 100 g da amostra pela peneira de 420 μm e separa-se 20 g do material passante. Dentro de um recipiente e com o auxílio de uma espátula mistura-se o material com água destilada, até que a pasta homogênea apresente consistência plástica que permita moldar quatro pequenas esferas semelhantes com facilidade.

As esferas são roladas com a palma da mão contra a placa de vidro, formando cilindros (Figura 3-18) com aproximadamente 3 mm de diâmetro. Então, junta-se o filamento formando uma nova esfera e inicia-se o procedimento de rolamento novamente. O processo é realizado até que o filamento cilíndrico apresente rupturas quando o diâmetro está próximo a 3 mm de diâmetro (Figura 3-19).



Figura 3-18: Rolamento da amostra RJ2 sobre a superfície de vidro
Fonte: da Autora (2022)



Figura 3-19: Retalhos da amostra de RJ2 sobre a placa de vidro
Fonte: da Autora (2022)

O cilindro que apresentar diâmetro de 3 mm, após ruptura, deve ser colocado em cápsulas metálicas (Figura 3-20) e levadas a estufa de secagem para a medição do teor de umidade.



Figura 3-20: Filamento de RJ2
Fonte: da Autora (2022)

O limite de plasticidade (expresso em porcentagem arredondado) é obtido por meio da média aritmética do teor de umidade determinado para os quatro provetes. O material é considerado não plástico quando não é possível realizar o ensaio.

3.5 Ensaio do papel-filtro

Os materiais e métodos utilizados para medir a sucção do solo tiveram como base a norma americana ASTM D 5298 (2003) [71] e os procedimentos descritos por Marinho [50] e Fredlund [41].

Para o desenvolvimento do teste foram utilizados filtros de papel do tipo Whatman nº 42, filme plástico aderente, pinças e espátulas, líquido de controle (água destilada), uma balança analítica de ultra precisão com aproximação de 0,0001 g, estufa de secagem, cápsulas de alumínio, recipientes de vidro (Becker com capacidade de 250 ml e 500 ml), recipiente metálico com tampa para isolamento de seu interior, um dessecador de vidro com agente de secagem, além das amostras dos materiais de estudo (PP, RJ1 e RJ2). Outros materiais como luvas de latex, placa de vidro e tesoura foram utilizados para auxiliar no seguimento do ensaio. A bancada para confecção dos provetes é apresentada na Figura 3-21.



Figura 3-21: Materiais utilizados para a montagem dos provetes
Fonte: da Autora (2022)

A preparação do material para a montagem dos provetes foi realizada previamente umedecendo a amostra de solo com água destilada, armazenando-a num recipiente de vidro (Becker) e isolando-a com três camadas de filme plástico aderente (Figura 3-22 e Figura 3-23). Durante 24 horas a amostra úmida permaneceu em repouso para a equalização da umidade por todos os grãos.



Figura 3-22: Amostra de PP umedecidas
Fonte: da Autora (2022)



Figura 3-23: Amostras de RJ1 e RJ2 umedecidos
Fonte: da Autora (2022)

Nesse ensaio, foram feitos oito situações de umidade para o PP e RJ1 e nove situações de umidade para o RJ2, todos os cenários foram submetidos à temperatura ambiente e às condições normais. Além disso, o ensaio foi dividido em dois casos: o primeiro, foram realizadas cinco amostras – que apresentavam maior teor de umidade – para análise e verificação com diferentes idades² (5 idades) e teores de umidade distintas; o segundo, foram montadas duas amostras – com teores de umidade menores – para análise de sucção com idades (2 idades) recomendadas pela norma americana, ASTM D 5298-03. A Tabela 3-1, a seguir, apresenta as distribuições aplicadas de acordo com o material de estudo, além do total de amostras.

Tabela 3-1: Detalhamento de amostras e idades para o ensaio do papel filtro

Material	5 idades	2 idades	Totais	
	Nº de provetes	Nº de provetes	Nº de situações de teor de umidade	Nº de amostras
PP	3	5	8	25
RJ1	4	4	8	28
RJ2	4	5	9	30

Nota: Nº de provetes corresponde a diferentes teores de umidade; As idades correspondem ao número de dias de ensaio para cada amostra

Fonte: da Autora (2022)

Após esse período, os corpos de prova foram moldados em anéis, sobre a placa de vidro, com duas camadas de papel filtro, interior – em contato direto com amostra – e exterior – em contato com o papel filtro interior e separado da amostra. Coloca-se o filtro de papel, um sobre o outro, e adiciona-se a amostra úmida na parte superior.

Os provetes (amostra e W42) são envolvidos e cobertos por, ao menos, três camadas de filme plástico aderente, de modo que se encontre em isolamento do meio externo o material ensaiado. Por fim, armazena-se os corpos de prova em um recipiente fechado e controlado para evitar perdas de água para o ambiente (Figura 3-24).

Simultaneamente a este processo, recolhe-se a massa de cada papel de filtro e separa-se uma porção de solo, em cápsulas metálicas, para a identificação do teor de umidade do material em cada provete (Figura 3-25).

² Idade: Corresponde ao número de dias em que a amostra é submetida ao ensaio.



Figura 3-24: Provetes de RJ2 armazenados
Fonte: da Autora (2022)

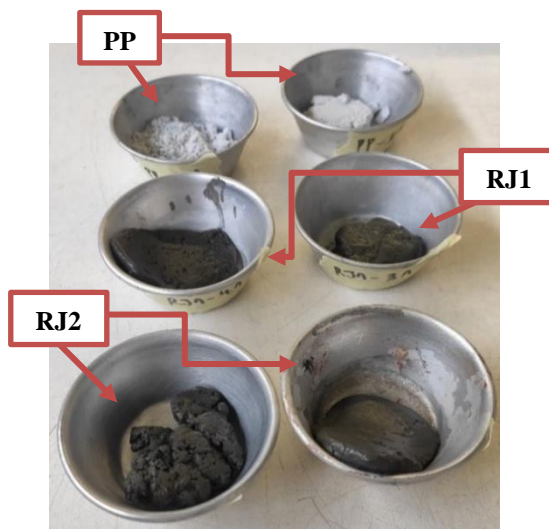


Figura 3-25: Amostras úmidas
Fonte: da Autora (2022)

Os provetes moldados devem permanecer em repouso e isolamento de (7 a 10 dias) até que se estabeleça o equilíbrio de sucção. Nesse estudo, utilizou-se de diversas idades (3, 5, 7, 10, 15 e 20 dias) para o mesmo teor de umidade, permitindo avaliar o comportamento do material submetido a diferentes períodos de sucção.

Ao final do período de teste, os anéis foram abertos e os papéis de filtro rapidamente retirados e colocados sobre a balança de ultra-precisão para aferição da massa de água absorvida (Figura 3-26). A diferença de massa do W42 entre o início e fim do procedimento corresponde a quantidade de água presente no papel filtro expresso em gramas.



Figura 3-26: Aferição das massas em balança de ultra-precisão
Fonte: da Autora (2022)

Além disso, cuidadosamente, recolheu-se a amostra em cápsulas metálicas que foram colocadas em estufa controlada a 105 °C (Figura 3-27) para obter o teor de umidade da amostra depois da

sucção (Figura 3-28), como ponte de equilíbrio com teor de umidade do papel filtro e, então, a sucção equivalente.



Figura 3-27: Secagem das amostras em estufa controlada
Fonte: da Autora (2022)

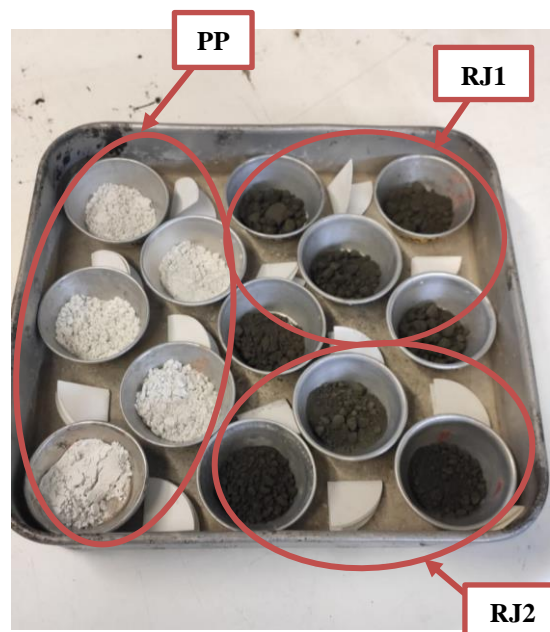


Figura 3-28: Amostras após período de sucção e correspondente papel filtro
Fonte: da Autora (2022)

Ao final da secagem em estufa, os provetes foram submetidos ao dessecador durante o período de 1 hora (Figura 3-29). O dessecador é um recipiente de vidro fechado com agente dessecante que é, geralmente, um composto incolor de sílica em gel – função de absorver a umidade – combinada com sais de cobalto – função de indicador de umidade.



Figura 3-29: Amostras de RJ2 no dessecador
Fonte: da Autora (2022)

Por fim, os provetes retirados da estufa, após passados pelo procedimento no dessecador, foram pesados, para a análise de umidade presentes nas amostras e nos papéis de filtro.

3.6 Calibração da curva de retenção

A curva de retenção ou curva característica de água, como visto anteriormente, é a relação entre a sucção e o teor de umidade do material. Para obter o teor de umidade, utilizou-se da metodologia do papel filtro W42, constituída das seguintes etapas:

- i. Contato entre solo e papel filtro;
- ii. Equilíbrio de sucção entre as umidades;
- iii. Determinação do teor de umidade do papel filtro e teor de umidade da amostra.

Então, a sucção do material é definida a partir de uma relação de calibração do teor de umidade do papel filtro com a sucção aplicável ao tipo de papel de filtro do procedimento teste (Figura 3-30). Além disso, a ASTM D 5298 (2003) [71] estima que a sucção total do papel de filtro é correspondente à sucção matricial da amostra.

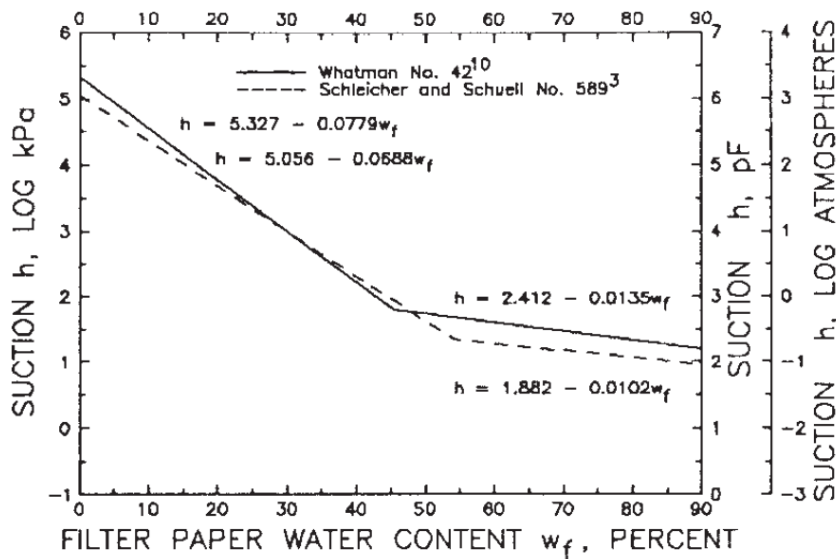


Figura 3-30: Calibração de curvas de sucção para umedecimento de papel filtro
Fonte: [71]

Por fim, a norma americana padroniza a sucção do papel de filtro Whatman nº 42 utilizando as seguintes condições e respectivas equações (Equação 3-2 e Equação 3-3).

Para $w < 45,3\%$

$$\log(\psi) = 5,327 - 0,0779 w \quad (3-1)$$

Para $w > 45,3\%$

$$\log(\psi) = 2,412 - 0,0135 w \quad (3-2)$$

Onde,

w = teor de umidade do papel filtro (%);

ψ = sucção (kPa).

Quando o equilíbrio entre o papel filtro e a amostra é estabelecido, significa que os dois materiais apresentam iguais potenciais de sucção, mas podem ou não apresentar o mesmo teor de umidade. Tendo conhecimento da curva calibrada do papel filtro, obtém-se o valor da pressão de sucção, de modo que possibilita a relação com o teor de umidade do provete.

Ao determinar a sucção e o teor de umidade, ambos são associados num diagrama de pontos em que o eixo das abcissas corresponde à sucção em escala logarítmica e o eixo das ordenadas equivale ao teor de umidade em escala linear.

O ajuste da curva foi feito com o auxílio da equação proposta por Fredlund e Xing (1994) [41], que, de maneira simplificada, substituindo Equação 2-22 em Equação 2-21, tem-se (Equação 3-3).

$$w = \left[\frac{-\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} + 1 \right] \left[\frac{w_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n \right] \right\}^m} \right] \quad (3-3)$$

Onde,

ψ = sucção (kPa);

w = teor de umidade (%).

Inicialmente, define-se a sucção correspondente ao teor de umidade residual (ψ_r) e o teor de umidade do solo saturado (w_s), aplica-se a Equação 3-3 utilizando um valor qualquer para os parâmetros (a , n e m).

Os parâmetros de ajuste da curva são corrigidos, com o auxílio do método dos mínimos quadrados, que consiste em minimizar o erro quadrático médio ao substituir o valor real pelo valor aproximado resultante da função de ajuste, a partir de um conjunto de pontos representativos, de modo que a curva expresse matematicamente o fenômeno em questão ([5];[73]). O procedimento adotado foi realizado com a ajuda da extensão Solver, através do Microsoft Excel (2022).

4. Resultados e discussões

4.1 Considerações iniciais

Este capítulo foi dividido em quatro grandes seções, sendo que as três primeiras seções estão relacionadas a cada um dos materiais de estudo – pó de pedra, rejeitos de mineração 1 e rejeitos de mineração 2 – com o intuito de unir suas características particulares e seus resultados encontrados; a quarta e última seção trata de situações observadas ao longo dos experimentos produzidos.

Além disso, nas seções em que diz respeito aos materiais, os resultados dos ensaios realizados, citados anteriormente nesta dissertação, foram divididos em dois grupos: o primeiro refere-se à caracterização dos materiais, o qual se obtém as características físicas e mecânicas e a classificação correspondente perante as normativas estudadas; o segundo apresenta os dados atingidos de sucção por meio das simulações de teor de umidade e, então, a respectiva *SWCC*.

Para tornar a leitura mais dinâmica, preferiu-se inserir o memorial de cálculo nos anexos A, B, C e D desta dissertação.

4.2 Pó de pedra

4.2.1 Caracterização do pó de pedra

O primeiro ensaio desempenhado foi de densidade das partículas e, para esse, foi necessário realizar o ajuste de densidade referente ao líquido de controle (água destilada), conforme a norma ISO/TS 17892-3 (2004) [18] recomenda, devido a diferença de temperatura. Em seguida, obteve-se a densidade do material pó de pedra, utilizando a média aritmética entre os três

provetes ensaiados. O resultado encontrado é apresentado no Quadro 4-1 e a densidade definida para a o material é de 2,55 g/cm³.

Quadro 4-1: Densidade dos grãos de PP

NÚMERO DO PICNÔMETRO			213 (pc100)	295 (pc100)	397 (pc100)
T	Temperatura do ensaio	°C	27,2	27,3	27,4
K	Razão entre as densidades da água à temperatura de ensaio e a 20°C		0,9971	0,9971	0,9971
ρ	Densidade das partículas	g/cm ³	2,5842	2,5389	2,5383
MÉDIA DAS DENSIDADES DAS PARTÍCULAS		g/cm ³	2,5538		

Fonte: da Autora (2022)

Detalhes sobre o procedimento de cálculo adotado encontram-se no Anexo A desta dissertação.

A análise granulométrica do pó de pedra foi realizada em duas etapas, por meio dos ensaios de peneiração e sedimentação. No entanto, o material retido nas peneiras de abertura igual ou superior a 63 μm , apresentou-se pouco relevante em relação à fração total da amostra. No Quadro 4-2 é representado os diâmetros equivalentes, em milímetro, de sedimentação ao longo de 48h de ensaio e as percentagens de material passante. Mais informações sobre os cálculos dos ensaios de peneiração e sedimentação encontram-se no Anexo B desta dissertação.

Quadro 4-2: Sedimentação do pó de pedra

SEDIMENTAÇÃO	d	K (%)	$N_D = n_D \times ((100 - N'_{10})/100)$
	0,0668	67,6	67,6
	0,0484	62,6	62,6
	0,0351	57,7	57,7
	0,0263	44,5	44,5
	0,0191	37,9	37,9
	0,0143	31,3	31,3
	0,0103	28,0	28,0
	0,0075	18,1	18,1
	0,0054	13,2	13,2
	0,0027	9,9	9,9
	0,0016	4,9	4,9
	0,0011	4,9	4,9

Fonte: da Autora (2022)

As dimensões das partículas variam entre 125 μm e 1,6 μm sendo que 86,9% representa o material fino constituído por silte e argila. A curva granulométrica para o material PP é apresentada na Figura 4-1.

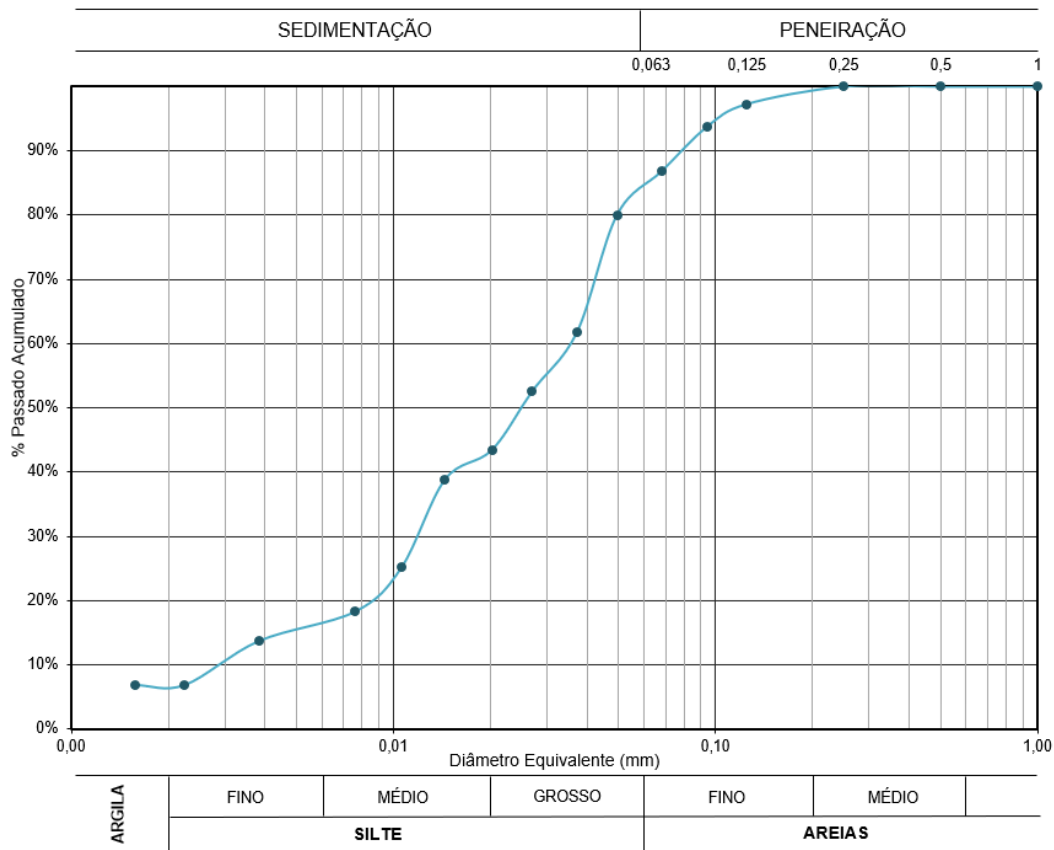


Figura 4-1: Curva granulométrica do pó de pedra

Fonte: da Autora (2022)

A partir da curva granulométrica é possível observar que o material apresenta granulometria reduzida a finos. A fração mais representativa (80%) corresponde a silte, seguida de areia fina com 13,1% e, por fim, a fração da argila que é a menos predominante com 6,9%.

Não foi possível realizar os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade para o material denominado PP, pois notou-se baixo potencial higroscópico, ou seja, dificuldade na retenção de água por meio das partículas. Dessa forma, o pó de pedra é classificado como material não plástico.

Acrescenta-se que um solo com limites de liquidez e de plasticidade baixo ou nulo tendem a ter pouca presença de argila (abaixo de 10%), confirmando o resultado obtido nos ensaios de sedimentação e limites de Atterberg.

As características do PP estudado estão apresentadas, de forma resumida, na Tabela 4-1.

Tabela 4-1: Caracterização do material pó de pedra

Material	Classificação	ρ (g/cm ³)	G_s	LL (%)	LP (%)	Consistência
PP	Silte	2,5538	2,5538	-	-	Não Plástico

Nota: ρ - densidade de partículas; G_s - densidade relativa dos grãos; LL - limite de liquidez; LP - limite de plasticidade

Fonte: da Autora (2022)

4.2.2 Curva de retenção de água do pó de pedra

A curva de retenção foi desenvolvida por meio do método do papel filtro e a equação de calibração utilizada corresponde à equação sugerida pela ASTM D 5298 (2003) para o papel filtro do modelo Whatman n° 42.

Todos os corpos de prova foram saturados com água destilada e submetidos ao método do papel filtro descrito em 3.5. No Quadro 4-3 estão apresentados os valores obtidos para os provetes de pó de pedra úmido no início e no final do ensaio, considerando o período de repouso e equalização, além de apresentar a umidade do papel filtro e a força de sucção, conforme a calibração da norma americana, entre o conjunto. Detalhes sobre o procedimento de cálculo adotado encontram-se no Anexo D desta dissertação.

Quadro 4-3: Dados de umidade e sucção para o PP por meio do papel filtro

MATERIAL	NÚMERO DO PROVETE	CÓDIGO DA AMOSTRA	Data de molde:	Data de desmolde:	t	w _i	w _f	w _{pf}	ψ
					Duração:	Teor de umidade inicial da amostra:	Teor de umidade final da amostra:	Teor de umidade do papel filtro:	Sucção:
					dias	%	%	%	kPa
PP	1	1.1	10/mai	13/mai	3	57,48%	45,36%	182,45%	0,89
		1.2	10/mai	16/mai	6	57,48%	47,64%	169,28%	1,34
		1.3	10/mai	17/mai	7	57,48%	44,85%	177,96%	1,02
		1.4	10/mai	23/mai	13	57,48%	44,04%	148,14%	2,58
		1.5	10/mai	25/mai	15	57,48%	43,37%	110,41%	8,34
	2	2.1	13/mai	16/mai	3	36,08%	29,69%	70,60%	28,77
		2.2	13/mai	18/mai	5	36,08%	28,41%	68,25%	30,94
		2.3	13/mai	23/mai	10	36,08%	27,55%	77,94%	22,90
		2.4	13/mai	28/mai	15	36,08%	25,09%	65,47%	33,74
		2.5	13/mai	02/jun	20	36,08%	20,61%	62,59%	36,91
	3	3.1	13/mai	16/mai	3	52,16%	45,02%	143,65%	2,97
		3.2	13/mai	18/mai	5	52,16%	45,59%	164,75%	1,54
		3.3	13/mai	23/mai	10	52,16%	46,75%	150,25%	2,42
		3.4	13/mai	28/mai	15	52,16%	44,19%	94,83%	13,55
		3.5	13/mai	02/jun	20	52,16%	42,30%	105,50%	9,72
	4	4.1	17/jun	24/jun	7	30,29%	22,44%	54,16%	47,96
		4.2	17/jun	27/jun	10	30,29%	19,65%	48,85%	56,55
	5	5.1	17/jun	24/jun	7	22,34%	13,80%	39,69%	171,73
		5.2	17/jun	27/jun	10	22,34%	16,09%	39,78%	169,06
	6	6.1	17/jun	24/jun	7	15,47%	8,44%	35,56%	360,26
		6.2	17/jun	27/jun	10	15,47%	7,54%	25,80%	2075,58
	7	7.1	17/jun	24/jun	7	10,25%	5,43%	25,28%	2278,52
		7.2	17/jun	27/jun	10	10,25%	3,99%	23,38%	3203,88
	8	8.1	17/jun	24/jun	7	7,25%	2,17%	19,47%	6463,21
8.2		17/jun	27/jun	10	7,25%	0,92%	14,54%	15654,64	

Fonte: da Autora (2022)

Em seguida, apresentam-se os valores de sucção em relação ao teor de umidade final do material de estudo – pó de pedra – por meio de um diagrama de pontos (Figura 4-2). Também, sugere-se uma curva de tendência de sucção.

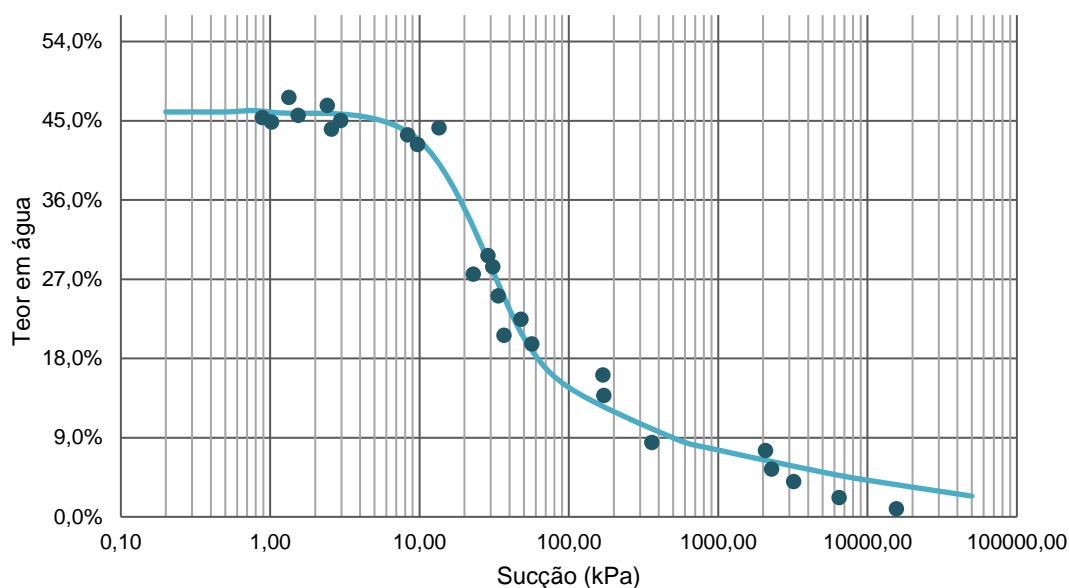


Figura 4-2: Curva de retenção de água para o pó de pedra

Fonte: da Autora (2022)

Nota-se que a curva apresenta valores de sucção maior à medida que reduz a umidade da amostra, justificado pelo aumento da força de atração entre os grãos e as moléculas de água. Os parâmetros ajustados para a curva são $\psi_r = 2000$ kPa, $w_s = 46\%$, $a = 16,1987$, $n = 2,5234$ e $m = 0,7405$. A curva é expressa pela Equação 4-1.

$$w = \left[\frac{-\ln \left(1 + \frac{\psi}{2000} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{2000} \right)} + 1 \right] \left[\frac{0,46}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{16,1987} \right)^{2,5234} \right] \right\}^{0,7405}} \right] \quad (4-1)$$

Onde,

ψ = sucção (kPa);

w = teor de umidade (%).

4.3 Rejeitos de mineração 1

4.3.1 Caracterização dos rejeitos de mineração 1

Tal como o material PP, o primeiro ensaio feito em conjunto entre os materiais foi de densidade das partículas e, para esse, também foi necessária a realização de ajuste de densidade referente à água destilada, devido a diferença de temperatura. Em seguida, obteve-se a densidade do material de rejeitos de mineração 1, utilizando a média aritmética entre os três provetes ensaiados. O resultado encontrado é apresentado no Quadro 4-4 e a densidade definida para o material é de $4,10 \text{ g/cm}^3$.

Quadro 4-4: Densidade dos grãos de RJ1

NÚMERO DO PICNÔMETRO			213 (pc100)	295 (pc100)	397 (pc100)
T	Temperatura do ensaio	°C	20,9	20,8	20,9
K	Razão entre as densidades da água à temperatura de ensaio e a 20°C		0,9980	0,9981	0,9980
ρ	Densidade das partículas	g/cm ³	4,1049	4,0682	4,1396
MÉDIA DAS DENSIDADES DAS PARTÍCULAS		g/cm ³	4,1042		

Fonte: da Autora (2022)

Solos com altos teores de metais de base comumente apresentam densidade elevada (acima de 3 g/cm³), confirmando, então, que o material estudado é proveniente de minas de exploração mineral. Detalhes sobre o procedimento de cálculo adotado encontram-se no Anexo A desta dissertação.

A análise granulométrica dos rejeitos de mineração 1 foi realizada em duas etapas, por meio dos ensaios de peneiração e sedimentação. No entanto, o material retido nas peneiras de abertura igual ou superior a 63 µm, apresentou-se pouco relevante em relação à fração total da amostra. No Quadro 4-5 é representado os diâmetros equivalentes, em milímetro, de sedimentação ao longo de 48h de ensaio e as percentagens de material passante. Mais informações sobre os cálculos dos ensaios de peneiração e sedimentação encontram-se no Anexo B desta dissertação.

Quadro 4-5: Sedimentação do rejeito de mineração 1

SEDIMENTAÇÃO	d	K	$N_D = n_D \times ((100 - N'_{10})/100)$
	0,0416	72,2	72,2
	0,0294	72,2	72,2
	0,0208	72,2	72,2
	0,0161	60,2	60,2
	0,0135	30,8	30,8
	0,0111	5,4	5,4
	0,0078	4,0	4,0
	0,0055	4,0	4,0
	0,0039	4,0	4,0
	0,0020	4,0	4,0
	0,0011	4,0	4,0
0,0008	4,0	4,0	

Nota: d - diâmetro equivalente das partículas (mm); K - fração menor do diâmetro equivalente (%); N_D - porcentagem retida na fração correspondente (%)

Fonte: da Autora (2022)

As dimensões das partículas variam entre 63 μm e 0,8 μm sendo que 97,7% representa o material fino constituído por silte e argila. A predominância de partículas finas (silte-argila) acontece, principalmente, devido ao processo de beneficiamento dos minérios, que corresponde às operações de moagem, para diminuição do tamanho das partículas, e separação física e magnética. A curva granulométrica para o material RJ1 é apresentada na Figura 4-3.

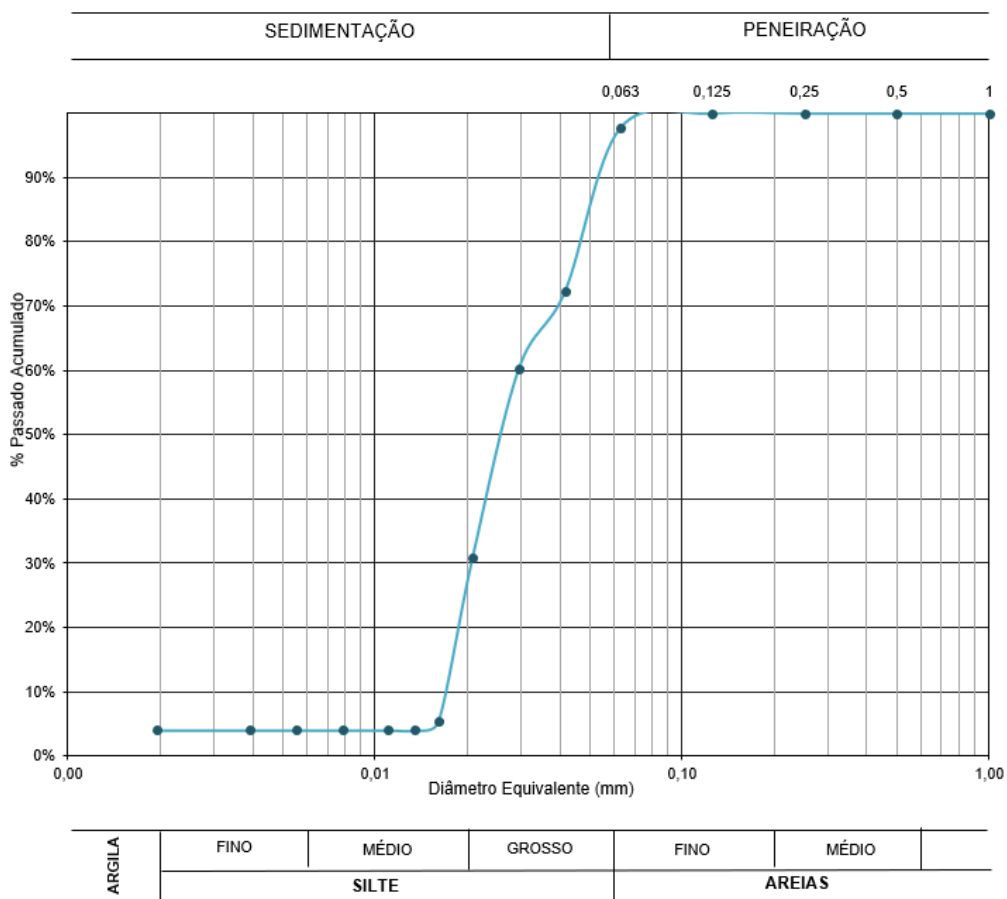


Figura 4-3: Curva granulométrica do rejeito de mineração 1

Fonte: da Autora (2022)

A partir da curva granulométrica é possível observar que o material apresenta granulometria reduzida a finos. A fração mais representativa (93,3%) corresponde a silte, seguida de argila com 4,0% e, por fim, a fração de areia fina que é a menos predominante com 2,3%.

Os limites de Atterberg foram determinados, por meio da preparação de quatro provetes para cada um dos ensaios (liquidez e plasticidade). No Quadro 4-6 nota-se os valores dos teores de umidade obtidos para o material RJ1 através deles.

Quadro 4-6: Limites de Atterberg para RJ1

LL - Limite de Liquidez					
NÚMERO DO PROVETE		1	2	3	4
Teor em água	%	21,8021	20,0546	20,9685	19,5574
N - NÚMERO DE PANCADAS		21	39	22	30
LP - Limite de Plasticidade					
NÚMERO DO PROVETE		1	2	3	4
Teor em água	%	20,784	21,054	20,612	20,469
MÉDIA DOS TEORES EM ÁGUA		20,7296			

Fonte: da Autora (2022)

Após efetuado o ensaio de Casagrande, os valores obtidos para os teores de umidade são dispostos num diagrama de pontos que relaciona o número de golpes – eixo das abscissas em escala logarítmica – e o teor de umidade ou teor em água da amostra – eixo das ordenadas em escala linear. Através da interpolação de pontos, traça-se uma reta. Em seguida, identifica-se a marca correspondente aos 25 golpes e encontra-se o teor em água por meio da intersecção da reta, representada na Figura 4-4 abaixo.

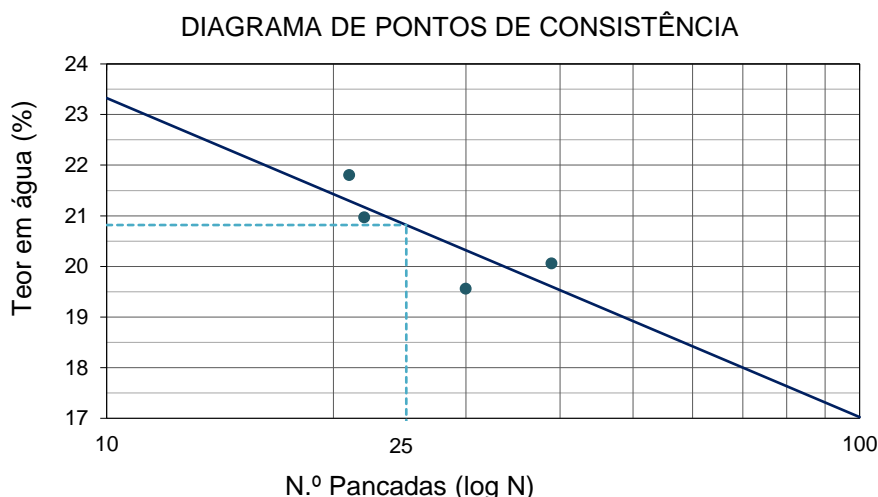


Figura 4-4: Diagrama de consistência de RJ1

Fonte: da Autora (2022)

O teor em água verificado no diagrama (Figura 4-4), após arredondamento, representa o limite de liquidez. Além disso, a média dos teores de umidade seguido de arredondamento, observados no Quadro 4-6 para o LP, equivale ao limite de plasticidade. Os valores de LL e LP para o material RJ1 correspondem a 21 e 21, respectivamente. Outras informações sobre o procedimento de cálculo adotado encontram-se no Anexo C desta dissertação.

Desse modo, é possível concluir que o material é não plástico e apresenta consistência muito mole caracterizado por escorrer com facilidade entre os dedos, se apertadas nas mãos. Destaca-se que um solo com limites de liquidez e de plasticidade baixo ou nulo tendem a ter pouca presença de argila (abaixo de 10%), confirmando a relevância do ensaio de sedimentação.

As características dos rejeitos de mineração 1, estudadas acima, estão apresentadas na Tabela 4-2 de forma resumida.

Tabela 4-2: Caracterização do material rejeito de mineração 1

Material	Classificação	ρ (g/cm ³)	G_s	LL (%)	LP (%)	Consistência
RJ1	Silte	4,1042	4,1042	21	21	Não Plástico

Nota: ρ - densidade de partículas; G_s - densidade relativa dos grãos; LL - limite de liquidez; LP - limite de plasticidade

Fonte: da Autora (2022)

4.3.2 Curva de retenção de água dos rejeitos de mineração 1

A curva de retenção foi desenvolvida por meio do método do papel filtro e a equação de calibração utilizada corresponde à equação sugerida pela ASTM D 5298 (2003) para o papel filtro do modelo Whatman nº 42.

Todos os corpos de prova foram saturados com água destilada e submetidos ao método do papel filtro descrito em 3.5. No Quadro 4-7 estão apresentados os valores obtidos para os provetes de rejeitos de mineração 1 úmido no início e no final do ensaio, considerando o período de repouso e equalização, além de apresentar a umidade do papel filtro e a força de sucção, conforme a calibração da norma americana, entre o conjunto. Detalhes sobre o procedimento de cálculo adotado encontram-se no Anexo D desta dissertação.

Quadro 4-7: Dados de umidade e sucção para RJ1 por meio do papel filtro

MATERIAL	NÚMERO DO PROVETE	CÓDIGO DA AMOSTRA	Data de molde:	Data de desmolde:	t	w _i	w _f	w _{pf}	ψ
					Duração:	Teor de umidade inicial da amostra:	Teor de umidade final da amostra:	Teor de umidade do papel filtro:	Sucção:
					dias	%	%	%	kPa
RJ1	1	1.1	10/mai	13/mai	3	29,20%	25,76%	164,65%	1,55
		1.2	10/mai	16/mai	6	29,20%	25,88%	151,57%	2,32
		1.3	10/mai	17/mai	7	29,20%	26,25%	167,13%	1,43
		1.4	10/mai	23/mai	13	29,20%	25,54%	158,52%	1,87
		1.5	10/mai	25/mai	15	29,20%	25,51%	163,49%	1,60
	2	2.1	13/mai	16/mai	3	22,52%	20,09%	76,95%	23,62
		2.2	13/mai	18/mai	5	22,52%	19,80%	63,59%	35,77
		2.3	13/mai	23/mai	10	22,52%	19,01%	40,46%	149,71
		2.4	13/mai	28/mai	15	22,52%	18,77%	33,58%	513,78
		2.5	13/mai	02/jun	20	22,52%	16,05%	26,67%	1775,75
	3	3.1	13/mai	16/mai	3	26,01%	21,93%	115,16%	7,20
		3.2	13/mai	18/mai	5	26,01%	21,42%	103,49%	10,35
		3.3	13/mai	23/mai	10	26,01%	22,47%	93,88%	13,95
		3.4	13/mai	28/mai	15	26,01%	21,86%	78,38%	22,58
		3.5	13/mai	02/jun	20	26,01%	14,75%	49,10%	56,12
	4	4.1	13/mai	16/mai	3	31,01%	26,45%	172,41%	1,21
		4.2	13/mai	18/mai	5	31,01%	25,61%	158,55%	1,87
		4.3	13/mai	23/mai	10	31,01%	25,90%	132,93%	4,14
		4.4	13/mai	28/mai	15	31,01%	26,06%	124,49%	5,39
		4.5	13/mai	02/jun	20	31,01%	16,81%	115,68%	7,09
	5	5.1	15/jun	22/jun	7	9,73%	9,71%	16,72%	10583,32
		5.2	15/jun	24/jun	9	9,73%	7,12%	15,71%	12682,34
	6	6.1	15/jun	22/jun	7	10,80%	9,46%	18,26%	8025,61
		6.2	15/jun	24/jun	9	10,80%	9,00%	18,52%	7656,56
	7	7.1	15/jun	22/jun	7	14,60%	12,91%	16,88%	10284,50
		7.2	15/jun	24/jun	9	14,60%	12,40%	17,16%	9785,33
	8	8.1	15/jun	22/jun	7	5,22%	4,98%	9,41%	39231,22
		8.2	15/jun	24/jun	9	5,22%	4,91%	11,12%	28878,67

Fonte: da Autora (2022)

Em seguida, apresentam-se os valores de sucção em relação ao teor de umidade final do material de estudo – rejeitos de mineração 1 – por meio de um diagrama de pontos (Figura 4-5). Também, sugere-se uma curva de tendência de sucção.

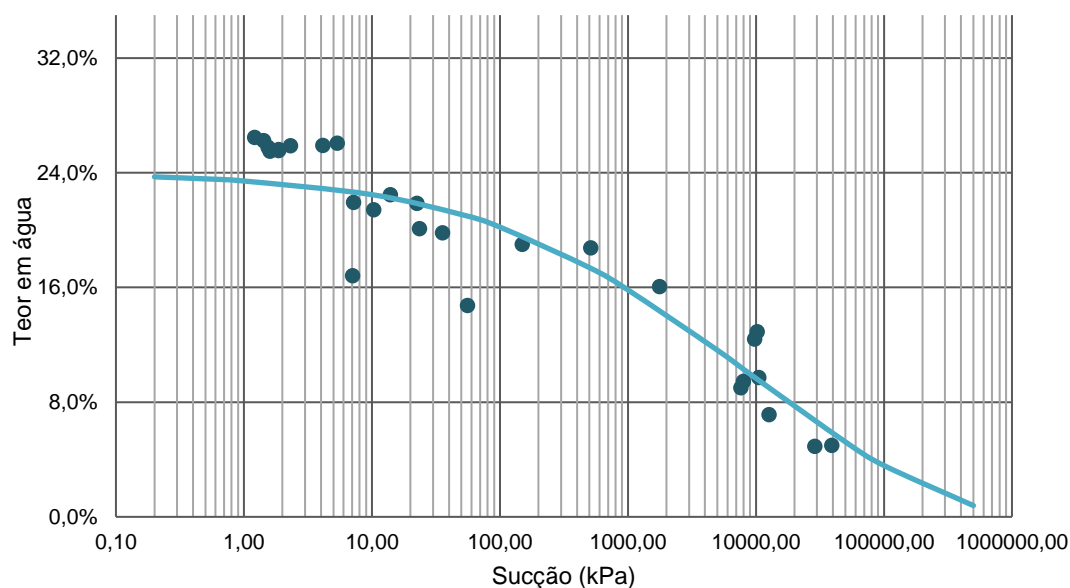


Figura 4-5: Curva de retenção de água para o rejeito de mineração 1

Fonte: da Autora (2022)

Nota-se que a curva apresenta valores de sucção menor à medida que aumenta a umidade da amostra, justificado pela redução da força de atração entre os grãos e as moléculas de água. Os parâmetros ajustados para a curva são $\psi_r = 28000$ kPa, $w_s = 24\%$, $a = 1440,8522$, $n = 0,4446$ e $m = 1,6881$. A curva é expressa pela Equação 4-2.

$$w = \left[\frac{-\ln \left(1 + \frac{\psi}{28000} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{28000} \right)} + 1 \right] \left[\frac{0,24}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{1440,8522} \right)^{0,4446} \right] \right\}^{1,6881}} \right] \quad (4-2)$$

Onde,

ψ = sucção (kPa);

w = teor de umidade (%).

4.4 Rejeitos de mineração 2

4.4.1 Caracterização dos rejeitos de mineração 2

À semelhança dos materiais apresentados anteriormente, fez-se necessária a realização de ajuste de densidade referente à água destilada, devido a diferença de temperatura, para o ensaio de densidade das partículas para o material de rejeitos de mineração 2. Em seguida, obteve-se a densidade de RJ2, utilizando a média aritmética entre os três provetes ensaiados. O resultado encontrado é apresentado no Quadro 4-8 e a densidade definida para a o material é de $3,90 \text{ g/cm}^3$.

Quadro 4-8: Densidade dos grãos de RJ2

NÚMERO DO PICNÔMETRO			213 (pc100)	295 (pc100)	397 (pc100)
T	Temperatura do ensaio	°C	18,5	18,6	18,5
K	Razão entre as densidades da água à temperatura de ensaio e a 20°C		0,9985	0,9985	0,9985
ρ	Densidade das partículas	g/cm ³	3,8875	3,8733	3,9255
MÉDIA DAS DENSIDADES DAS PARTÍCULAS		g/cm ³	3,8954		

Fonte: da Autora (2022)

Solos com altos teores de metais de base comumente apresentam densidade elevada (acima de 3 g/cm³), confirmando, então, que o material estudado é proveniente de minas de exploração mineral. Detalhes sobre o procedimento de cálculo adotado encontram-se no Anexo A desta dissertação.

A análise granulométrica dos rejeitos de mineração 2 foi realizada em duas etapas, por meio dos ensaios de peneiração e sedimentação. No entanto, o material retido nas peneiras de abertura igual ou superior a 63 μm , apresentou-se pouco relevante em relação à fração total da amostra. No Quadro 4-9 é representado os diâmetros equivalentes, em milímetro, de sedimentação ao longo de 48h de ensaio e as percentagens de material passante. Mais informações sobre os cálculos dos ensaios de peneiração e sedimentação encontram-se no Anexo B desta dissertação.

Quadro 4-9: Sedimentação do rejeito de mineração 2

SEDIMENTAÇÃO	d	K	$N_D = n_D \times ((100 - N'_{10})/100)$
	0,0480	58,1	58,1
	0,0349	54,1	54,1
	0,0261	44,6	44,6
	0,0189	40,6	40,6
	0,0137	35,2	35,2
	0,0103	29,7	29,7
	0,0074	24,3	24,3
	0,0053	20,3	20,3
	0,0039	13,5	13,5
	0,0020	6,8	6,8
	0,0012	5,4	5,4
0,0008	4,1	4,1	

Nota: d - diâmetro equivalente das partículas (mm); K - fração menor do diâmetro equivalente (%); N_D - porcentagem retida na fração correspondente (%)

Fonte: da Autora (2022)

As dimensões das partículas variam entre 125 µm e 0,8 µm sendo que 87,3% representa o material fino constituído por silte e argila. Assim como o RJ1, a predominância de partículas finas (silte-argila) em RJ2 acontece, principalmente, devido ao processo de beneficiamento dos minérios. A curva granulométrica para o material RJ2 é apresentada na Figura 4-6.

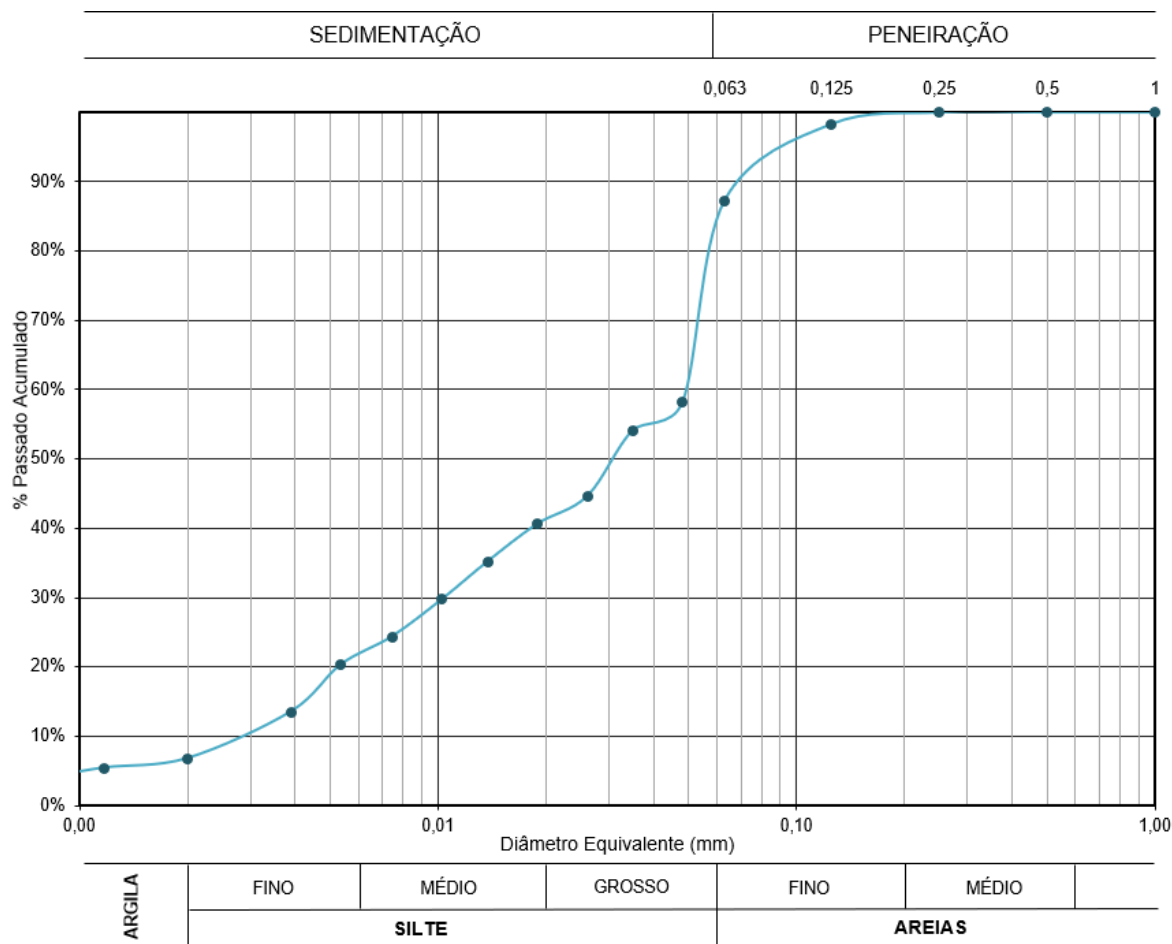


Figura 4-6: Curva granulométrica do rejeito de mineração 2

Fonte: da Autora (2022)

A partir da curva granulométrica é possível observar que o material apresenta granulometria reduzida a finos. A fração mais representativa (80,5%) corresponde a silte, seguida de areia fina com 12,7% e, por fim, a fração de argila que é a menos predominante com 6,8%.

No Quadro 4-10 observa-se os valores dos teores de umidade obtidos através dos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade para o material RJ2, após submetido a quatro testes (provetes), referente aos limites de Atterberg.

Quadro 4-10: Limites de Atterberg para RJ2

LL - Limite de Liquidez					
NÚMERO DO PROVETE		1	2	3	4
Teor em água	%	20,1831	18,5149	19,7127	18,3704
N - NÚMERO DE PANCADAS		17	33	19	38
LP - Limite de Plasticidade					
NÚMERO DO PROVETE		1	2	3	4
Teor em água	%	21,125	19,512	20,476	18,911
MÉDIA DOS TEORES EM ÁGUA		20,0058			

Fonte: da Autora (2022)

Similar aos rejeitos de mineração 1, o limite de liquidez para o RJ2 foi definido depois de distribuir os valores obtidos para os teores de umidade num diagrama de pontos relacionando número de golpes e teor de umidade. Por meio da reta de interpolação, identificou-se a marca correspondente aos 25 golpes e definiu-se o teor em água. O limite de liquidez é representado na Figura 4-7 a seguir.

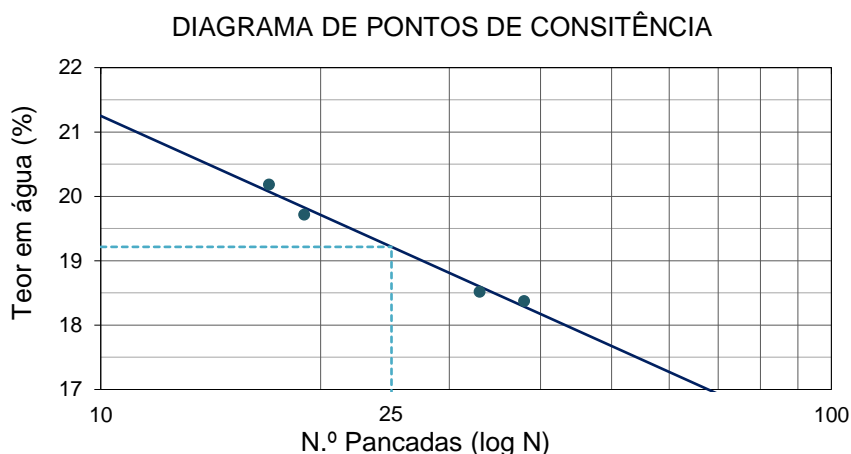


Figura 4-7: Diagrama de consistência de RJ2

Fonte: da Autora (2022)

O teor em água verificado na Figura 4-7, após arredondamento, representa o limite de liquidez. Além disso, a média dos teores de umidade seguido de arredondamento, observados no Quadro 4-10 para o LP, equivale ao limite de plasticidade. Os valores de LL e LP, respectivamente, para o material RJ2 correspondem a 19 e 20. Outras informações sobre o procedimento de cálculo adotado encontram-se no Anexo C desta dissertação.

Desse modo, é possível concluir que o material é não plástico e apresenta consistência muito mole, caracterizado por escorrer com facilidade entre os dedos, se apertadas nas mãos. Destaca-se que um solo com limites de liquidez e de plasticidade baixo ou nulo tendem a ter pouca presença de argila (abaixo de 10%), confirmando a relevância do ensaio de sedimentação.

As características dos rejeitos de mineração 2, apresentadas acima, estão resumidas na Tabela 4-3.

Tabela 4-3: Caracterização do material rejeito de mineração 2

Material	Classificação	ρ (g/cm ³)	G_s	LL (%)	LP (%)	Consistência
RJ2	Silte	3,8954	3,8954	19	20	Não Plástico

Nota: ρ - densidade de partículas; G_s - densidade relativa dos grãos; LL - limite de liquidez; LP - limite de plasticidade

Fonte: da Autora (2022)

4.4.2 Curva de retenção de água dos rejeitos de mineração 2

A curva de retenção foi desenvolvida por meio do método do papel filtro e a equação de calibração utilizada corresponde à equação sugerida pela ASTM D 5298 (2003) para o papel filtro do modelo Whatman nº 42.

Todos os corpos de prova foram saturados com água destilada e submetidos ao método do papel filtro descrito em 3.5. No Quadro 4-11 estão apresentados os valores obtidos para os provetes de rejeitados mineiros 2 úmido no início e no final do ensaio, considerando o período de repouso e equalização, além de apresentar a umidade do papel filtro e a força de sucção, conforme a calibração da norma americana, entre o conjunto. Detalhes sobre o procedimento de cálculo adotado encontram-se no Anexo D desta dissertação.

Quadro 4-11: Dados de umidade e sucção para RJ2 por meio do papel filtro

MATERIAL	NÚMERO DO PROVETE	CÓDIGO DA AMOSTRA	Data de molde:	Data de desmolde:	t	w _i	w _f	w _{pf}	ψ
					Duração:	Teor de umidade inicial da amostra:	Teor de umidade final da amostra:	Teor de umidade do papel filtro:	Sucção:
					dias	%	%	%	kPa
RJ2	1	1.1	10/mai	13/mai	3	21,44%	19,45%	62,54%	36,95
		1.2	10/mai	16/mai	6	21,44%	19,25%	53,05%	49,63
		1.3	10/mai	17/mai	7	21,44%	18,27%	41,60%	121,91
		1.4	10/mai	23/mai	13	21,44%	18,20%	42,84%	97,64
		1.5	10/mai	25/mai	15	21,44%	18,34%	36,55%	301,62
	2	2.1	10/mai	13/mai	3	21,73%	18,34%	139,19%	3,41
		2.2	10/mai	16/mai	6	21,73%	18,61%	131,56%	4,32
		2.3	10/mai	17/mai	7	21,73%	18,94%	139,58%	3,37
		2.4	10/mai	23/mai	13	21,73%	18,68%	115,45%	7,14
		2.5	10/mai	25/mai	15	21,73%	19,01%	103,77%	10,26
	3	3.1	10/mai	13/mai	3	31,99%	24,78%	173,57%	1,17
		3.2	10/mai	16/mai	6	31,99%	24,03%	184,69%	0,83
		3.3	10/mai	17/mai	7	31,99%	25,26%	160,16%	1,78
		3.4	10/mai	23/mai	13	31,99%	24,43%	157,14%	1,95
		3.5	10/mai	25/mai	15	31,99%	24,22%	162,94%	1,63
	4	4.1	13/mai	16/mai	3	24,57%	20,26%	167,69%	1,41
		4.2	13/mai	18/mai	5	24,57%	19,55%	160,72%	1,75
		4.3	13/mai	23/mai	10	24,57%	20,60%	155,72%	2,04
		4.4	13/mai	28/mai	15	24,57%	19,88%	141,93%	3,13
		4.5	13/mai	02/jun	20	24,57%	18,38%	60,21%	39,73
	5	5.1	07/jun	13/jun	6	21,31%	17,14%	39,69%	171,72
		5.2	07/jun	13/jun	6	21,31%	18,35%	53,17%	49,46
	6	6.1	17/jun	24/jun	7	15,33%	13,01%	27,13%	1634,86
		6.2	17/jun	27/jun	10	15,33%	12,06%	28,88%	1195,10
	7	7.1	17/jun	24/jun	7	10,34%	6,26%	29,47%	1073,83
		7.2	17/jun	27/jun	10	10,34%	5,50%	25,46%	2205,66
	8	8.1	17/jun	24/jun	7	8,34%	4,84%	23,76%	2994,36
		8.2	17/jun	27/jun	10	8,34%	3,23%	24,51%	2614,18
	9	9.1	17/jun	24/jun	7	5,78%	2,44%	22,82%	3544,09
		9.2	17/jun	27/jun	10	5,78%	1,64%	14,71%	15168,70

Fonte: da Autora (2022)

Em seguida, apresentam-se os valores de sucção em relação ao teor de umidade final do material de estudo – rejeitos de mineração 2 – por meio de um diagrama de pontos (Figura 4-8). Também, sugere-se uma curva de tendência de sucção.

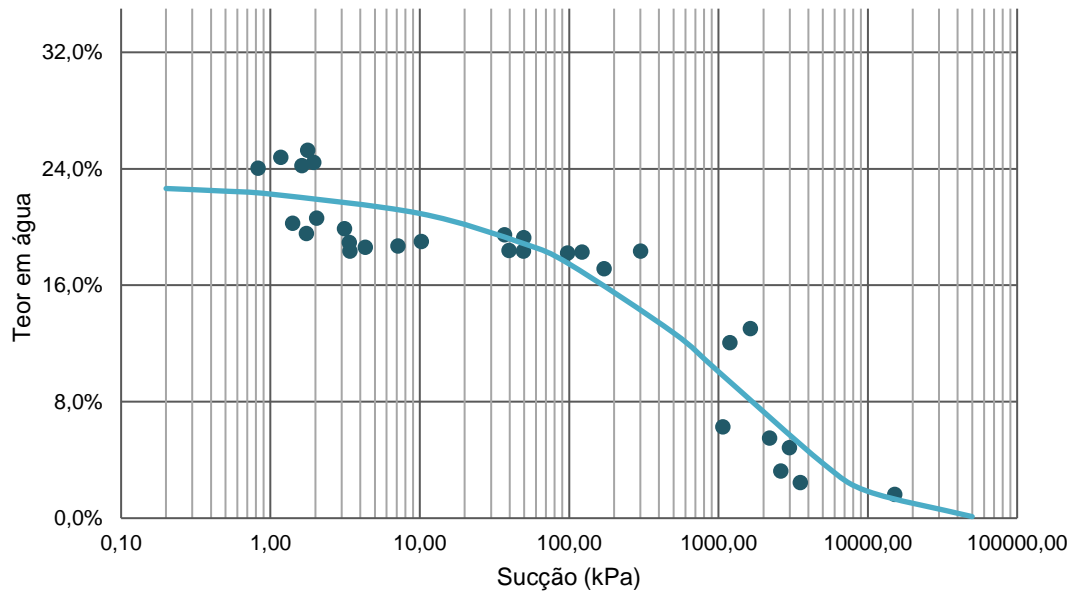


Figura 4-8: Curva de retenção de água para o rejeito de mineração 2

Fonte: da Autora (2022)

Nota-se que a curva apresenta valores de sucção maior à medida que reduz a umidade da amostra, justificado pelo incremento da força de atração entre os grãos e as moléculas de água. Os parâmetros ajustados para a curva são $\psi_r = 3200$ kPa, $w_s = 23\%$, $a = 1367117673$, $n = 0,4597$ e $m = 1399,9052$. A curva é expressa pela Equação 4-3.

$$w = \left[\frac{-\ln \left(1 + \frac{\psi}{3200} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{3200} \right)} + 1 \right] \left[\frac{0,23}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{1367117673} \right)^{0,4597} \right] \right\}^{1399,9052}} \right] \quad (4-3)$$

Onde,

ψ = sucção (kPa);

w = teor de umidade (%).

4.5 Discussões

Ao longo dos experimentos realizados com as amostras de pó de pedra, rejeitos de mineração 1 e rejeitos de mineração 2, foram observadas situações de comportamento e efeito sobre os procedimentos e materiais utilizados. Na sequência serão descritas estas ocorrências.

4.5.1 Caracterização dos materiais

As características dos três materiais (PP, RJ1 e RJ2) foram obtidas através de ensaios laboratoriais. Os valores de densidade das partículas sólidas para cada material correspondem

à média entre os três picnômetros utilizados, obtendo-se 2,55 g/cm³ para o pó de pedra, 4,10 g/cm³ para os rejeitos de mineração 1 e 3,90 g/cm³ para os rejeitos de mineração 2.

Por meio da análise dos resultados e com o auxílio da Figura 4-9, verifica-se que as três amostras apresentam granulometria fina, constituída predominantemente por silte e argila (86%, 97% e 87%, respectivamente, para PP, RJ1 e RJ2), e pouco extensa, uma vez que as dimensões das partículas estão compreendidas entre 0,002 mm e 0,125 mm. Além disso, é possível afirmar que a fração de silte é dominante em relação à fração de argila nos três estudos de caso. Ainda, por meio da Figura 4-9, nota-se que o material rejeito de mineração 1 possui relevante descontinuidade granulométrica em relação à dimensão de suas partículas.

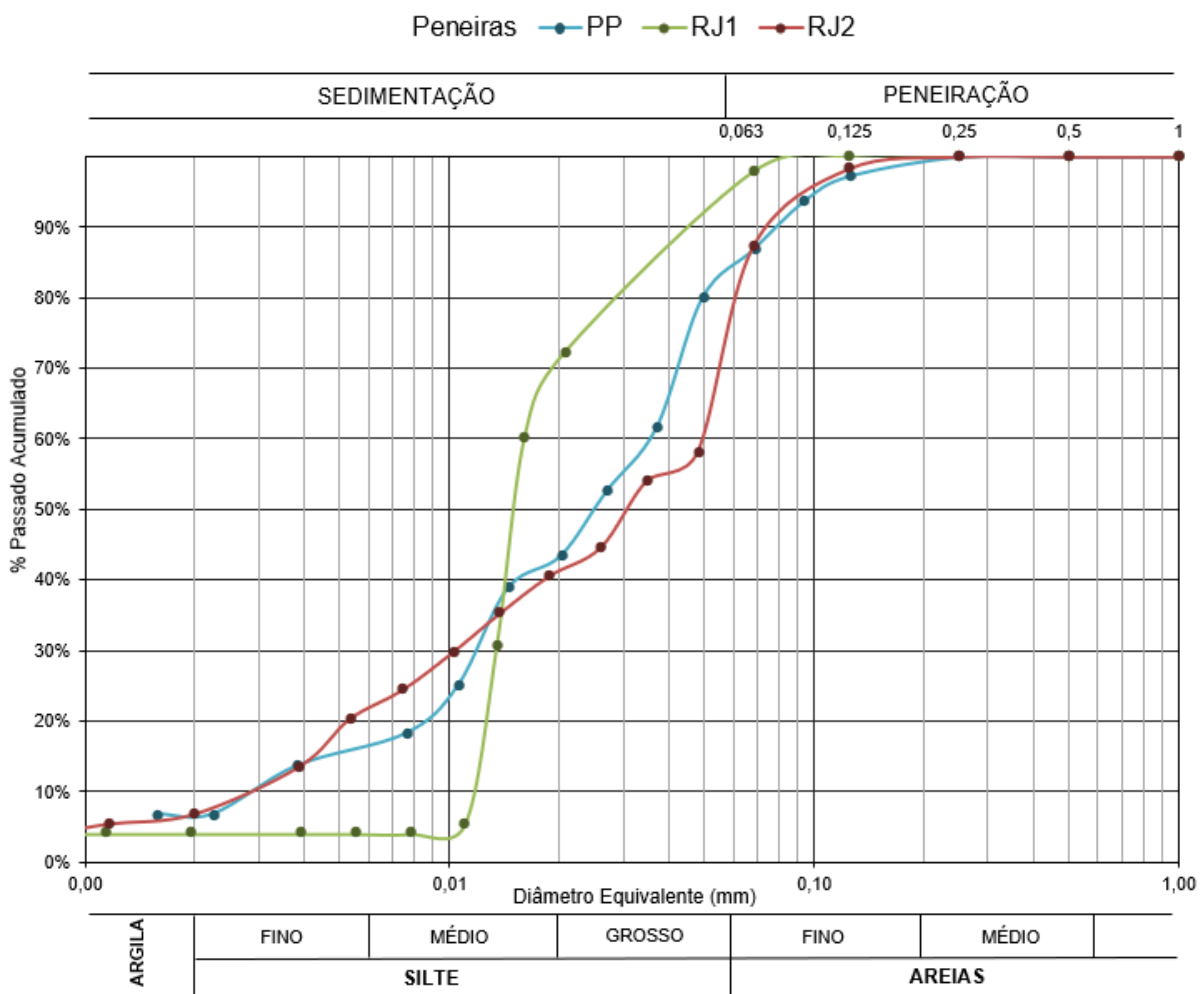


Figura 4-9: Curva granulométrica
 Fonte: da Autora (2022)

Os ensaios dos limites de Atterberg permitiram determinar um índice de plasticidade pequeno, nulo ou inexistente. Através da Carta de Plasticidade de Casagrande (Figura 2-22) e com base nas curvas granulométricas e os índices de plasticidade identificados, concluí-se que os três materiais de estudo (PP, RJ1 e RJ2) são classificados como silte não plástico.

Além disso, vale ressaltar que os valores obtidos para o LL e LP (19 e 20, respectivamente) para RJ2 não devem ser considerados, pois pela definição destes limites o limite de liquidez

deve ser sempre maior que o limite de plasticidade, devido o maior ou menor teor de umidade. Tal resultado foi obtido com esta amostra devido às características do material e comprova o fato de ele ser não plástico.

4.5.2 Modelo de retração

O procedimento para a análise de retração não foi realizado, pois os materiais demonstraram comportamento não plástico e, portanto, o ensaio não é obrigatório. Ainda, como apresentado em 2.4.5, o ensaio que é normatizado pela NP-143 (1969) utiliza mercúrio e a substância é altamente poluente e prejudicial à saúde humana. Além disso, como observado nos ensaios de caracterização dos materiais – PP, RJ1 e RJ2 – os três não apresentam características plásticas, não sendo recomendado a execução do experimento. Dessa forma, optou-se pela não realização da técnica.

No entanto, coletou-se os materiais molhados de outros ensaios desempenhados, dos quais apresentavam o uso de grande quantidade de água, e colocou-se em estufa a 105 °C para secagem. Notou-se que os materiais apresentam caráter retrátil (Figura 4-10 e Figura 4-11), pois evidenciaram grandes abertura de fendas e fissuras após secagem.



Figura 4-10: Retração de RJ1 durante secagem em estufa a 105 °C
Fonte: da Autora (2022)



Figura 4-11: Retração de RJ2 durante secagem em estufa a 105 °C
Fonte: da Autora (2022)

Verificado a importância da realização do ensaio, sugere-se como método alternativo para a obtenção da retração a substituição do mercúrio líquido por parafina. Os procedimentos entre os dois métodos são similares, diferindo na forma preencher e calcular o volume do provete seco.

No primeiro método proposto, o volume do provete seco é determinado usando-se o volume de mercúrio deslocado. Já no segundo método que utiliza a parafina, o volume do provete seco final é determinado após sucessivas inserções do provete em parafina derretida a 60 °C, até atingir total recobrimento do provete. Então o provete parafinado seco é imerso em água

destilada, de modo a obter-se o volume deslocado de água que corresponde ao volume do provete parafinado [40].

O volume do provete mais a parafina é obtido pela Equação 4-4.

$$V_1 = \frac{m_{1,s} - m_{1,w}}{\rho_w} \quad (4-4)$$

Onde,

V_1 = volume da amostra parafinada (cm³);

$m_{1,s}$ = massa da amostra parafinada seca ao ar (g);

$m_{1,w}$ = massa da amostra parafinada imersa em água (g);

ρ_w = densidade da água (g/cm³).

O volume da parafina utilizada é obtido pela Equação 4-5.

$$V_p = \frac{m_{1,s} - m_{a,s}}{\rho_p} \quad (4-5)$$

Onde,

V_p = volume da parafina (cm³);

$m_{a,s}$ = massa da amostra seca ao ar (g);

ρ_p = densidade da parafina (g/cm³).

O volume do provete parafina utilizada é obtido pela Equação 4-6.

$$V_{a,f} = V_1 - V_p \quad (4-6)$$

Onde,

$V_{a,f}$ = volume da amostra final (cm³).

Então o limite de contração pode ser obtido a partir da Equação 4-7, proposta por Satancati, Nogueira e Vilar (1981) [40].

$$LC = w_a - \frac{(V_{a,i} - V_{a,f}) \times \rho_w}{m_{a,s}} \quad (4-7)$$

Onde,

V_a = volume da amostra (cm³).

w_a = teor de umidade da amostra de moldagem (%);

$V_{a,i}$ = volume inicial do molde do provete (cm³).

4.5.3 Papel filtro

Os estudos referentes à metodologia do papel filtro sugerem a utilização de uma camada de papel filtro de proteção devido a aderência de materiais ao papel (Figura 4-12). Conforme a

granulométrica de caráter fino das amostras, recomenda-se o uso da camada de proteção, além da dobradura do papel filtro ensaiado para evitar qualquer tipo de contato e adesão de partículas ao papel de filtro.

Durante a execução do ensaio, notou-se a presença de marcas de oxidação no papel de filtro proveniente da ação da água sobre os minérios dos rejeitos (Figura 4-13). Também, foi possível observar a formação de manchas sobre alguns dos papéis de filtro, o que pode indicar a presença de contaminação na amostra (Figura 4-14).

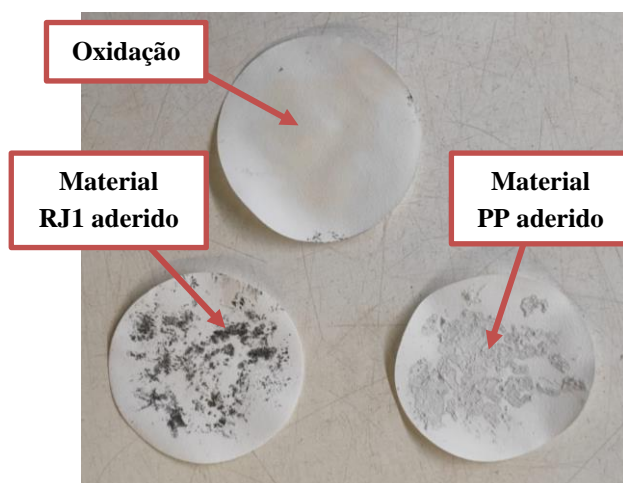


Figura 4-12: Papel filtro após ensaio de sucção
Fonte: da Autora (2022)



Figura 4-13: Papel filtro de rejeitos de mineração com marcas de oxidação
Fonte: da Autora (2022)

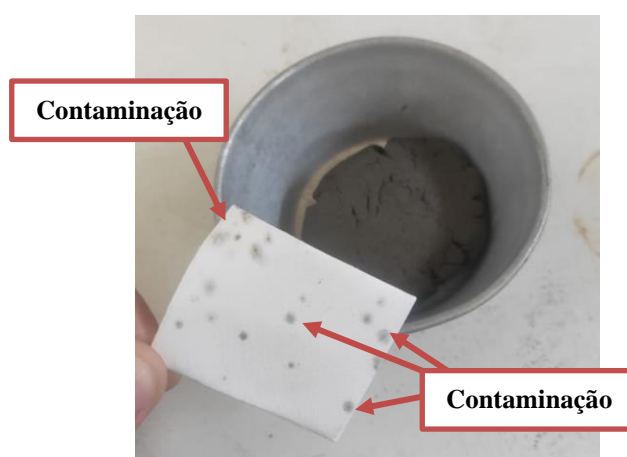


Figura 4-14: Provete de RJ2 e papéis filtro secos
Fonte: da Autora (2022)

4.5.4 Curva característica de retenção de água

A curva característica de água, ou simplesmente SWCC, como apresentado anteriormente em 2.5.2, é fundamental para a análise da disponibilidade de água do material. A quantidade de

retenção de água depende da natureza da fração da partícula e, principalmente, do teor de água disponível.

No ensaio realizado com o método do papel filtro, as simulações dos três materiais apresentaram diferenças consideráveis no potencial de sucção para amostras com elevado teor de umidade inicial de acordo com o período de repouso (3, 5, 15 e 20 dias), indicando saturação do papel.

A escolha final das idades (7 e 10 dias) deu-se conforme recomenda-se a norma ASTM D 5298 (2003), bem como a equação de calibração do papel filtro. No entanto, em relação ao ajuste de curva, o modelo escolhido corresponde à aproximação sugerida por Fredlund e Xing (1994), com o auxílio do método dos mínimos quadrados.

A Figura 4-15 traz o comparativo da curva de retenção dos três materiais (PP, RJ1 e RJ2). Por meio da análise dos resultados, nota-se maior semelhança no desenho entre as curvas dos rejeitos de mineração (RJ1 e RJ2) e aproximação entre os dados obtidos, comportamento possivelmente justificado devido à origem dos materiais (moagem de pedra x subproduto da mineração).

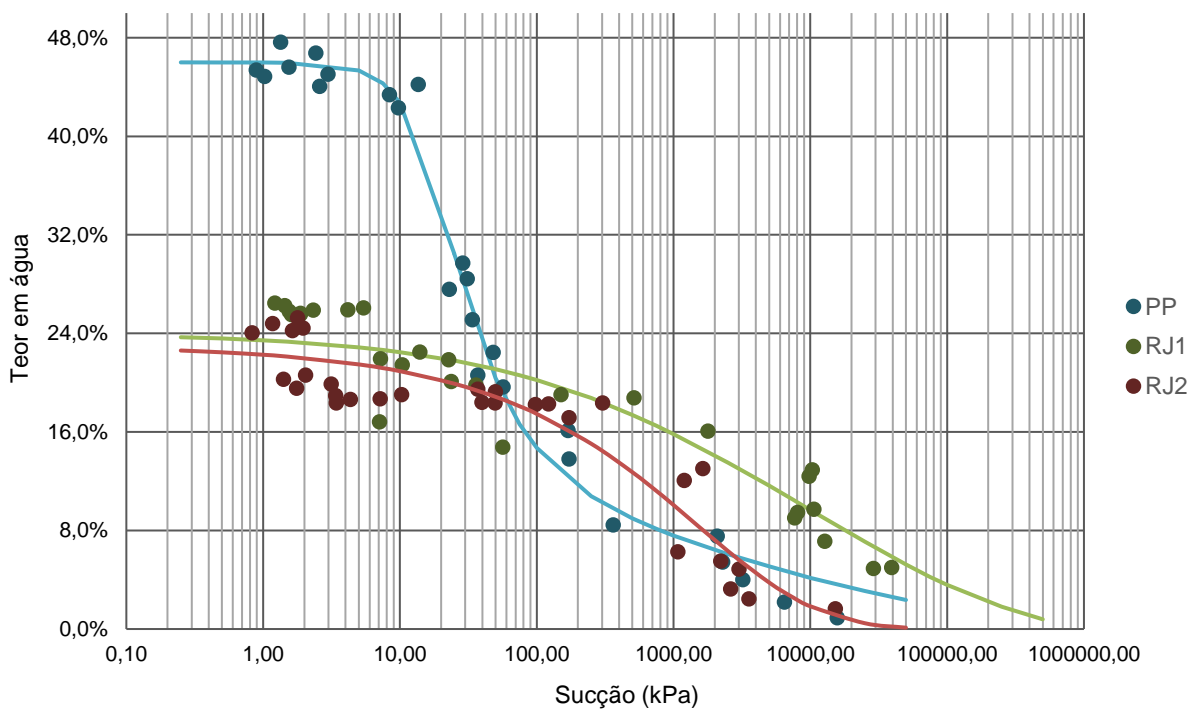


Figura 4-15: Curva de retenção de água
Fonte: da Autora (2022)

Além disso, os rejeitos de mineração obtiveram teor de umidade de saturação menores que o pó de pedra, de modo que o aspecto da curva para esses materiais não tenha traçado similar aos solos típicos (formato de S). Por meio da curva, é possível observar, também, que a diminuição no teor de umidade suaviza a forma em S da curva de retenção para o material pó de pedra, o mesmo não ocorre para os materiais rejeitos de mineração 1 e rejeitos de mineração 2.

Através dos resultados obtidos, pelo método do papel filtro, constatou-se maior relevância para valores de sucção matricial no estado não saturado dos materiais (PP, RJ1 e RJ2). Ainda, observou-se que para pressões de sucção maiores, o tempo de equilíbrio (idade do provete) entre a amostra úmida e o papel filtro tende a aumentar, justificados pelos fenômenos de capilaridade e de adsorção. Em que, para altos conteúdos de água, a manifestação da capilaridade (diretamente ligada à densidade e à porosidade do material) são de maior importância na retenção água, enquanto a ocorrência da adsorção (relacionada à textura e à superfície das partículas) é prevalecida para menores quantidades de água.

Por fim, verificou-se que o método do papel filtro é satisfatório e pode ser utilizado para obtenção da curva de retenção de água dos três materiais – pó de pedra, rejeitos de mineração 1 e rejeitos de mineração 2. Contudo, para a melhoria do desempenho do modelo do papel filtro, sugere-se a padronização das dimensões do provete, tendo em vista que perdas de material são facilmente notadas ao longo da montagem e desmontagem dos provetes constituídos de materiais finos.

5. Conclusões

5.1 Conclusões gerais

Este trabalho teve como objetivo definir o comportamento não saturado de três materiais, sendo eles: pó de pedra (PP), proveniente da moagem de pedra; rejeitos de mineração 1 e rejeitos de mineração 2 (RJ1 e RJ2), subprodutos do beneficiamento de mineral. Assim, utilizou-se de cinco etapas:

- Identificação e caracterização dos materiais;
- Desenvolvimento do caso de estudo por meio da metodologia do filtro de papel;
- Calibração do modelo papel filtro;
- Determinação da curva de retenção de água dos rejeitos;
- Definição das equações matemáticas que melhor ajustam os parâmetros experimentais.

Na sequência, a fim de expor o estudo de forma detalhada, apresentam-se as conclusões específicas para cada capítulo.

Capítulo 2 – Estado da arte

Relatou-se o processo de obtenção dos rejeitos de mineração, provenientes da natureza, através de processos industriais e como são manipulados ao longo do beneficiamento, do transporte e da deposição do rejeitado para a construção dos reservatórios. Detalhou-se os mecanismos de concepção de uma barragem de lama de rejeitos de mineração, como destino final do material. Descreveu-se os procedimentos de caracterização, bem como os cálculos adotados, segundo às normas nacionais e internacionais para identificar e classificar os rejeitos de mineração. Solidificou-se a importância do estudo da água no solo a medida que se definiu os conceitos de sucção e curva característica de retenção da água do solo, além de expor os modelos de obtenção

da curva de retenção e as diferentes metodologias utilizados para o estudo. Por fim, contextualizou-se os fundamentos da metodologia do papel filtro para a obtenção da SWCC.

Capítulo 3 – Metodologia

Detalhou-se os ensaios adotados para a caracterização dos materiais – PP, RJ1 e RJ2 – e os mecanismos realizados no laboratório durante o estudo de caso. Os procedimentos empregados são eles:

- Densidade de partículas sólidas com base na normativa ISO/TS 17892-3 (2004);
- Análise granulométrica por meio dos ensaios de peneiração e sedimentação – método do densímetro – segundo a norma ISO/TS 17892-4 (2004);
- Limites de Atterberg, sendo eles o limite de liquidez e o limite de plasticidade, conforme a norma NP-143 (1969);
- Sucção por meio do papel filtro segundo a metodologia descrita por Marinho (2006) e Fredlund (2012).

Por fim, a curva e as equações de calibração da sucção do papel filtro foram selecionadas segundo a norma ASTM D 5298 (2003), conforme o modelo do papel filtro adotado (W42) e a curva de retenção foi ajustada conforme descreve Fredlund e Xing (1994).

Capítulo 4 – Resultados e discussões

Obteve-se as características dos materiais de acordo com as normativas e avaliação dos resultados conforme o compartilhamento dos dados obtidos. Definiu-se para o pó de pedra a densidade de $2,55 \text{ g/cm}^3$, o rejeitado mineiro 1 apresentou densidade $4,10 \text{ g/cm}^3$ e o rejeitado mineiro 2 teve $3,90 \text{ g/cm}^3$. Os três materiais exibiram granulometria fina, predominantemente siltosa, e caráter não plástico.

O método do papel filtro foi selecionado pela facilidade e agilidade de execução e seu baixo custo. Para garantir a qualidade do teste, os ensaios foram realizados em temperatura ambiente e armazenados em ambiente fechado. Ainda, é possível que ocorra perdas no ensaio devido ao manuseio do papel de filtro ou contato dos materiais com outras superfícies durante a montagem dos provetes.

O estudo evidenciou a aderência de partículas ao papel de filtro, provocando perda de massa, como consequência do aumento de sucção durante o fenômeno de secagem. Também, fenômenos como a oxidação do papel filtro e a formação de bolores foram observados.

As simulações dos três materiais apresentaram diferenças consideráveis no potencial de sucção para amostras com elevado teor de umidade de acordo com o período de repouso (3, 5, 15 e 20 dias), indicando saturação do papel filtro.

Ainda que seja recomendado o ensaio para diferentes intervalos de sucções, os resultados obtidos, por meio do modelo do papel filtro, apresentaram maior relevância para valores de sucção matricial no estado não saturado dos materiais (PP, RJ1 e RJ2).

Os rejeitos de mineração (RJ1 e RJ2) aproximaram-se em relação ao desenho da curva de retenção quando comparado ao PP. Além disso, aqueles obtiveram teor de umidade de saturação menores que o pó de pedra. Observou-se também que a diminuição no teor de umidade suaviza a forma em S da curva de retenção para o material pó de pedra, o mesmo não ocorre para os materiais rejeitos de mineração 1 e rejeitos de mineração 2.

Apesar das influências externas que a metodologia está suscetível, o método do papel filtro mostrou-se satisfatório na determinação das curvas de retenção.

5.2 Sugestões de trabalhos futuros

A partir dos resultados obtidos e das observações no decorrer deste trabalho, sugere-se para trabalhos futuros:

- Efetuar ensaios de retração com parafina sobre amostras de rejeitos de mineração, para se obter o comportamento volumétrico de acordo com o teor em água do material;
- Implementar o ensaio edométrico para estudar a compressibilidade dos rejeitos de mineração, simulando situações in situ de carregamento e descarregamento;
- Realizar o ensaio triaxial para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos rejeitos de mineração;
- Determinar as relações constitutivas (índice de vazios x permeabilidade e índice de vazios x tensão efetiva) dos rejeitos de mineração por meio do ensaio de adensamento hidráulico;
- Avaliar a influência das propriedades mineralógicas sobre as características dos rejeitos de mineração, com base na origem da rocha bruta;
- Investigar a influência da quantidade de material ensaiado sobre os resultados da sucção.

Além desses, têm relevância continuar o estudo a partir de outros ensaios complementares.

REFERÊNCIAS

- [1] H. P. Caputo, *Mecânica dos solos e suas aplicações*, 6ª edição., bd. 1. 1988.
- [2] A. B. da Luz og L. A. Freitas, «Introdução ao tratamento de minérios», i *Tratamento de Minérios*, A. B. da Luz, J. A. Sampaio, og S. C. A. França, Red. Rio de Janeiro, 2010, s. 3–20.
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas, *ABNT NBR 13028: Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos*. 2017, s. 16.
- [4] F. A. E. Lozano, «Seleção de locais para barragens de rejeitos», Universidade de São Paulo, 2006.
- [5] N. P. Raposo, «Deposição de rejeitados espessados», Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2016.
- [6] M. C. De Rezende Neto, K. C. Ferreira, M. F. M. De Oliveira, og G. E. S. Valadão, «Obtenção de pastas minerais a partir do espessamento de lamas provenientes de processamento fosfático», *Holos*, bd. 7, s. 148, 2015, doi: 10.15628/holos.2015.3706.
- [7] E. F. Amorim, «Efeitos do processo de deposição hidráulica no comportamento de um rejeito de mineração de ouro», Universidade de Brasília, 2007.
- [8] R. J. Martim, T. R. Caetano, H. de A. Santos, og P. R. A. Aranha, «Deposição de rejeitos de minério de ferro em reservatórios», *An Interdiscip. J. Appl. Sci.*, bd. 11, nr. 4, 2016.
- [9] A. F. C. Jorge, «Determinação laboratorial de propriedades geotécnicas de rejeitados mineiros», 2020.
- [10] A. B. Luz, J. A. Sampaio, og S. C. A. França, *Tratamento de minérios*, 6ª Edição. 2018.
- [11] G. J. N. Barcelos, J. R. D. Lage, og J. S. Cordeiro, «Caracterização das barragens de rejeitos de mineração no Brasil», *Res. Soc. Dev.*, bd. 9, nr. 3, 2020, doi: 10.33448/rsd-v9i3.2478.
- [12] F. L. Lage, K. de M. Gonçalves, J. Cordeiro, og M. A. Lage, «Utilização dos rejeitos de minério de ferro na construção civil: uma análise cienciométrica», *Res. Soc. Dev.*, bd. 4, s. 54–67, 2020, [Online]. Tilgjenegleg pã: <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>.
- [13] B. ANEEL, «Relatório de Classificação das Barragens ANEEL». Brasília, DF, s. 19, 2020.
- [14] V. A. Rezende, «Estudo do comportamento de barragem de rejeito arenosos alteado por montante», Universidade Federal de Ouro Preto, 2013.
- [15] F. de M. Russo, «Comportamento de barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico: caracterização laboratorial e simulação numérica do processo construtivo», Universidade de Brasília, 2007.
- [16] «Entenda as barragens da Vale». http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/paginas/entenda-as-barragens-da-vale.aspx (vitja des. 30, 2021).

REFERÊNCIAS

- [17] C. de S. Pinto, *Curso básico mecânica dos solos*. 2006.
- [18] International Organization for Standardization, *ISO/TS 17892-3: Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil — Part 3: Determination of particle density — Pycnometer method*. 2004, s. 1–11.
- [19] J. A. R. Ortigão, *Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos*, bd. 3ª Edição. 2007.
- [20] A. O. M. Domingues, «Medição do teor de humidade e sua importância no diagnóstico», Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.
- [21] International Organization for Standardization, *NP EN ISO 17892-1: Reconhecimento e ensaios geotécnicos — Ensaio de laboratório em solos — Parte 1: Determinação do teor de água*. Portugal, 2014, s. 1–16.
- [22] International Organization for Standardization, *ISO/TS 17892-4: Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil — Part 4: Determination of particle size distribution*. 2004, s. 1–30.
- [23] Comitê Europeu de Normalização, *NP EN 933-1: Ensaio das propriedades geométricas dos agregados — Parte 1: Análise granulométrica – Método da peneiração*. 2014, s. 1–20.
- [24] K. J. A. og R. F. CRAIG, *Mecânica dos solos*, 8ª edição. 2014.
- [25] J. A. Dias, *A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos*, Versão pre. Faro: Universidade do Algarve, 2004.
- [26] «Manual da compactação, pavimentação e fresagem – Capítulo 02». <http://dynapac.blog/manual-de-compactacao-pavimentacao-e-fresagem/granulometria-consistencia-e-sedimentacao-o-que-voce-precisa-conhecer-para-obter-melhores-resultados-na-compactacao/?lang=pb> (vitja okt. 27, 2021).
- [27] Associação Brasileira de Normas Técnicas, *ABNT NBR 7181: Solo — Análise granulométrica*. 2016, s. 12.
- [28] Comitê Europeu de Normalização, *NP EN 933-2: Ensaio para determinação das características geométricas dos agregados — Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica — Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas*. 1999, s. 1–7.
- [29] P. C. Andrade og G. E. S. Valadão, «Planejamento experimental aplicado à sedimentação de lamas fosfáticas», *Holos*, bd. 6, s. 201–216, 2017.
- [30] C. M. V. Martins, «Caracterização laboratorial de solos — Nova normalização», Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2018.
- [31] B. M. Das, *Fundamentos de engenharia geotécnica*, 6ª edição. 2014.
- [32] «Densímetro». <https://ipemsp.files.wordpress.com/2015/11/densimetria.jpg> (vitja apr. 22, 2022).
- [33] Laboratório de Química, «Laboratório de Química», Minas Gerais, 2018. Vitja: aug. 31, 2022. [Online]. Tilgjengeleg på: <https://www.ufjf.br/quimica/files/2015/06/AULA-22.pdf>.
- [34] «Potencial mineral das argilas que recobrem as jazidas de gipsita na região de Araripina – PE», *Scientific Figure on ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Curva-da-distribuicao-granulometrica-da-mistura-de-argilas_fig3_315115308 (vitja

- des. 17, 2021).
- [35] F. Marinho, «Limite de liquidez e limite de plasticidade», mai 04, 2020. <https://www.guiadaengenharia.com/limite-liquidez-plasticidade/> (vitja okt. 27, 2021).
- [36] Norma Portuguesa, *NP 143: Solos — Determinação dos limites de consistência*. 1969, s. 8.
- [37] «Laboratório de mecânica dos solos». <https://docplayer.com.br/49658586-Sumario-laboratorio-de-mecanica-dos-solos-conceito-de-plasticidade-ensaios-ii-lp-lc-10-04-2016-christiane-wagner-mainardes-krainer.html> (vitja nov. 23, 2021).
- [38] Associação Brasileira de Normas Técnicas, *ABNT NBR 7180: Solo — Determinação do limite de plasticidade*. 2016, s. 3.
- [39] L. da Silva, «Retração do solo e relação com as propriedades físico-hídricas de latossolos e nitossolos do sul do Brasil», Universidade do Estado de Santa Catarina, 2019.
- [40] R. A. A. Aita, R. Facco, A. P. Werlang, og M. K. Werlang, «Método alternativo para a determinação do limite de contração a partir de pastilha parafinada em um argissolo vermelho distrófico arênico», *Geografia, Ensino & Pesquisa*, bd. 20, nr. 1, Santa Maria, s. 10, 2016.
- [41] D. G. Fredlund, H. Rahardjo, og M. D. Fredlund, *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. 2012.
- [42] G. C. P. de Almeida, «Caracterização física e classificação dos solos», *Universidade Federal de Juiz de Fora*. s. 145, 2005.
- [43] Associação Brasileira de Normas Técnicas, *ABNT NBR 6502: Rochas e solos*. 2022, s. 18.
- [44] International Organization for Standardization, *EN ISO 14688-1: Geotechnical investigation and testing, Identification and classification of soil — Part 1: Identification and description*. 2017, s. 22.
- [45] T. A. Rodrigues, «Caracterização geológico-geotécnica de solos para aplicação em obra de reabilitação de via ferroviária», 2019.
- [46] American Society for Testing and Materials International, *ASTM D2487: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*. 2006, s. 12.
- [47] Associação Brasileira de Normas Técnicas, *ABNT NBR 7250: Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos*. 1982, s. 3.
- [48] A. C. Chrystello, «Avaliação de curvas de calibração do método do papel filtro tipo Whatman n°42 utilizadas para estimar sucção matricial em solos não saturados», Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.
- [49] C. H. Nakashima, «Estudo de curvas características de solos que compõem o perfil geotécnico da formação guabiro tuba», Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.
- [50] F. A. M. Marinho og O. M. Oliveira, «The filter paper method revisited», *Geotech. Test. J.*, bd. 29, nr. 3, s. 250–258, 2006, doi: 10.1520/gtj14125.
- [51] K. F. Cupertino, «Análise de curvas de calibração utilizadas no método do papel filtro

REFERÊNCIAS

- para estimar a sucção matricial em solos não saturados», Universidade Federal do Espírito Santo, 2019.
- [52] G. A. Lira, «Avaliação da relação entre sucção e resistência de solos para fundações sobre aterros», nr. February, 2018.
- [53] M. L. do N. Silva, «Influência do tamanho da amostra na determinação da curva de retenção da água no solo», Universidade de São Paulo, 2016.
- [54] M. J. Davalo, «Curva de retenção de água no solo estimado pelo método da câmara de richards e psicrômetro», Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2013.
- [55] R. F. Jorge, J. E. Corá, og J. C. Barbosa, «Número mínimo de tensões para determinação da curva característica de retenção de água de um latossolo vermelho eutrófico sob sistema de semeadura direta», *Rev. Bras. Ciência do Solo*, bd. 34, nr. 6, s. 1831–1840, 2010, doi: 10.1590/s0100-06832010000600007.
- [56] Gilmar Batista Grigolon, «Curva de retenção de água no solo determinada a partir de um número mínimo de pares de umidade e tensão na câmara de Richards», Universidade de São Paulo, 2013.
- [57] F. A. M. Cássaro, J. A. T. de Oliveira, H. Cruz, og L. F. Pires, «Utilização de um sensor de umidade para o arduíno na determinação da curva característica de retenção de água por um sistema poroso», *Revista Brasileira de Ensino de Física*, bd. 42, 2020.
- [58] L. B. Taytelbaum, «Adaptação de um edômetro com controle de sucção para a determinação da curva característica de solos contaminados por óleo diesel», Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.
- [59] L. P. Menezes, W. L. Oliveira Filho, og C. H. C. Silva, «Determination of the soil water retention curve using the flow pump», *Rem Rev. Esc. Minas*, bd. 68, nr. 2, s. 207–213, 2015, doi: 10.1590/0370-44672015680108.
- [60] A. M. da Silva, «Estudo de parâmetros de compactação proctor no comportamento mecânico do solo», Universidade Federal de Campina Grande, 2015.
- [61] E. M. da Silva, J. E. F. W. Lima, J. A. de Azevedo, og L. N. Rodrigues, «Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado», *Pesqui. Agropecuária Bras.*, bd. 41, nr. 2, s. 323–330, 2006, doi: 10.1590/s0100-204x2006000200018.
- [62] A. G. Gusmão og M. T. de Moraes, «Impacto do uso e da textura na retenção de água em solos na Amazônia», 2021, s. 1–6.
- [63] F. J. R. da Paixão, A. R. S. de Andrade, C. A. V. de Azevedo, V. L. A. de Lima, og J. D. Neto, «Uso da aproximação fractal no ajuste da curva de retenção de água no solo», *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, bd. 13, nr. 3, s. 282–288, 2009, doi: 10.1590/s1415-43662009000300009.
- [64] F. A. M. Cássaro, L. F. Pires, R. A. dos Santos, D. Giménez, og K. Reichardt, «Funil de haines modificado: curvas de retenção de solos próximos à saturação», *Rev. Bras. Ciência do Solo*, bd. 32, nr. 6, s. 2555–2562, 2008, doi: 10.1590/s0100-06832008000600032.
- [65] J. F. de M. Filho, J. A. A. S. do Sacramento, og B. P. S. Conceição, «Curva de retenção de água elaborada pelo método do psicrômetro para uso na determinação do índice ‘S’ de qualidade física do solo», *Eng. Agric.*, bd. 35, nr. 5, s. 959–966, 2015, doi:

- 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n5p959-966/2015.
- [66] A. S. de A. Júnior, E. A. Bastos, R. Maschio, og E. M. da Silva, «Determinação da curva de retenção de água no solo em laboratório». Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária, Teresina, PI, s. 2, 2007.
- [67] G. L. Collares *mfl.*, «Retenção de água medida pelo método de placas porosas de richards e pelo psicrômetro de termopar», 1998.
- [68] W. G. Teixeira og S. B. Behring, «Reteção de água no solo pelos métodos da mesa de tensão e da câmara de Richards», i *Manual de Métodos de Análise de Solo*, 3^a Edição., P. C. Teixeira, G. K. Donagemma, A. Fontana, og W. G. Teixeira, Red. Brasília, DF, 2017, s. 34–46.
- [69] M. B. M. de Menezes og O. J. Pejon, «Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade», *Geociencias*, bd. 29, nr. 2, s. 211–228, 2010.
- [70] J. F. R. Lucas, M. H. F. Tavares, D. L. Cardoso, og F. A. M. Cássaro, «Curva de retenção de água no solo pelo método do papel-filtro», *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, bd. 35, nr. 6, s. 1967–1973, 2011.
- [71] American Society for Testing and Materials International, *ASTM D5298: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper*. United States, 2003, s. 6.
- [72] K. V Bicalho, A. Gomes Correia, S. Ferreira, og F. A. M. Marinho, «Filter paper method of soil suction measurement», *XIII Panam. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng.*, 2007.
- [73] R. N. de Almeida, «O método dos mínimos quadrados: Estudo e aplicações para o ensino médio», Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2015.

ANEXO A – DENSIDADE DAS PARTÍCULAS SEGUNDO A NORMA CEN ISO/TS 17892-3:2004

MATERIAL		PP			RJ1			RJ2		
NÚMERO DO PICNÔMETRO		213 (pc100)	295 (pc100)	397 (pc100)	213 (pc100)	295 (pc100)	397 (pc100)	213 (pc100)	295 (pc100)	397 (pc100)
m3	Picnômetro seco (g)	33,9729	30,9802	33,4456	33,9729	30,9802	33,4456	33,9729	30,9802	33,4456
m3	Picnômetro+água destilada (g)	131,6138	130,3113	132,1400	131,6138	130,3113	132,1400	131,6138	130,3113	132,1400
m5	Picnômetro+provete+água destilada (g)	148,9089	148,0799	149,7038	144,9214	148,2850	145,5688	147,0098	145,9015	146,6374
-	Cápsula n°.	1	2	3	1	2	3	1	2	3
A	Peso da cápsula (g)	26,0535	23,5124	25,6332	26,0535	23,5124	25,6332	26,0535	23,5124	25,6332
B	Provete seco + cápsula (g)	54,2136	52,7719	54,5600	43,6360	47,3291	43,3282	46,7709	44,5176	45,0763
m4=B-A	Provete seco (g)	28,1601	29,2595	28,9268	17,5825	23,8167	17,695	20,7174	21,0052	19,4431
T	Temperatura do ensaio (°C)	27,2	27,3	27,4	20,9	20,8	20,9	18,5	18,6	18,5
K	Razão entre as densidades da água à temperatura de ensaio e a 20°C	0,9971	0,9971	0,9971	0,9980	0,9981	0,9980	0,9985	0,9985	0,9985
ρ	Densidade das partículas	2,5842	2,5389	2,5383	4,1049	4,0682	4,1396	3,8875	3,8733	3,9255
MÉDIA DAS DENSIDADES DAS PARTÍCULAS		2,5538			4,1042			3,8954		

ANEXO B – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA SEGUNDO A NORMA CEN ISO/TS 17892-4:2004

1. Pó de Pedra (PP)

1.1. Peneiração

FRACÇÃO RETIDA NO PENEIRO 2 MM	PENEIROS		MATERIAL RETIDO			MATERIAL QUE PASSA
	Des.	Aberturas (mm)	Massa (g) m_x	% retida $N_x=(m_x/m_t) \times 100$	% acumulada N'_x	% acumulada $N''_x=100-N'_x$
	125 mm	125,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	63 mm	63,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	40 mm	40,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	20 mm	20,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	10 mm	10,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	5 mm	5,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	4 mm	4,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	2 mm	2,00	0,00	0,00	0,00	100,00
< 2,00 mm		153,30	100,00			
TOTALS =		153,30				

FRACÇÃO PASSADA NO PENEIRO 2 MM	Massa da amostra a ensaiar (g): $m_b = 153,30$ g					
	PENEIROS		MATERIAL RETIDO			MATERIAL QUE PASSA
	Des.	Aberturas (mm)	Massa (g) m_x	% retida (total) $n_x=(m_x/m_b) \times 100$	% acumulada n'_x	% acumulada $N''_x=n'_x (100-N_{10})/100$
	1 mm	1,000	0,00	0,0	100,0	100,0
	500 μ m	0,500	0,00	0,0	100,0	100,0
	250 μ m	0,250	0,00	0,0	100,0	100,0
	125 μ m	0,125	4,18	2,7	97,3	97,3
	63 μ m	0,063	14,44	9,4	87,9	87,9
	< 63 μ m		134,58	87,8		
	TOTALS =		153,20			

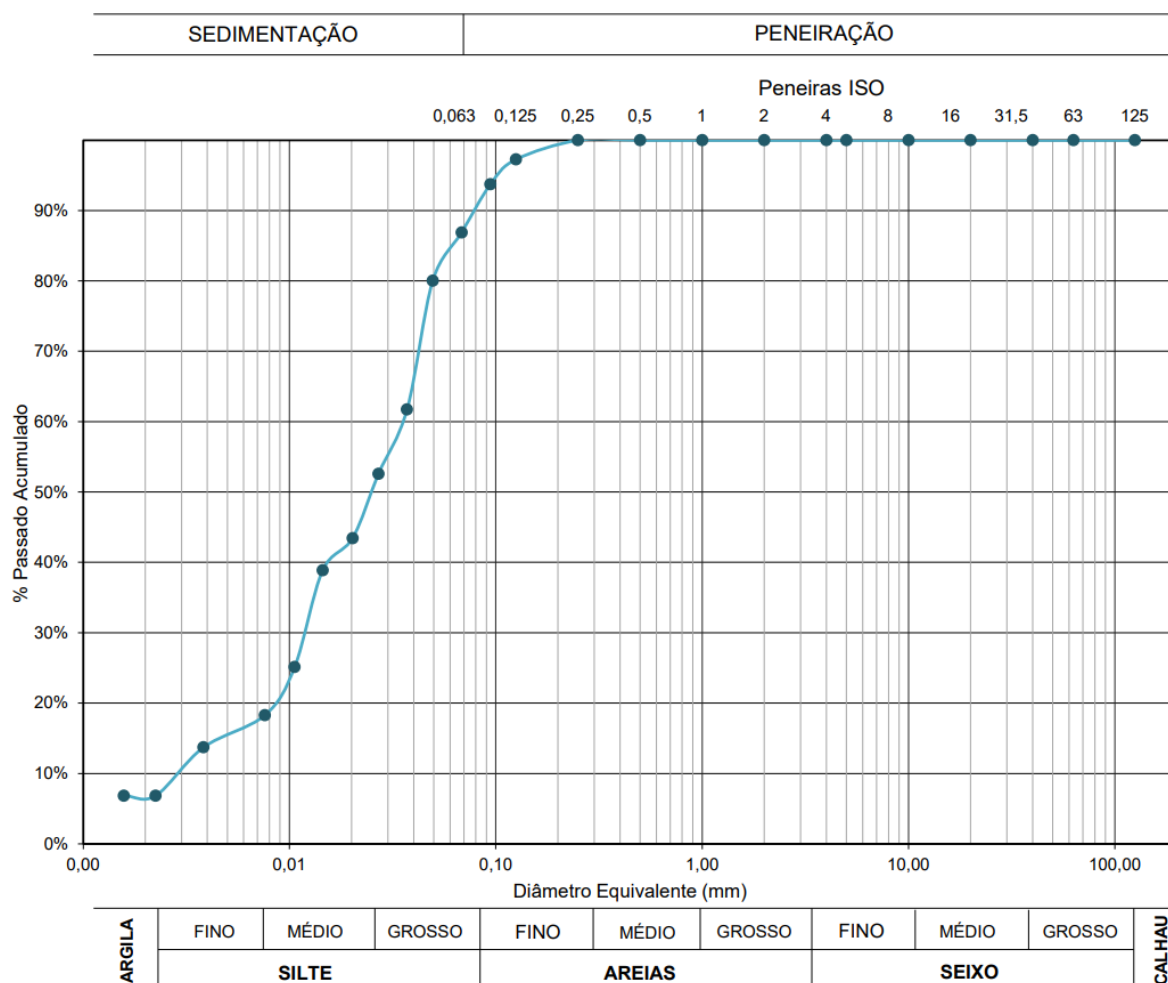
1.2. Sedimentação

Proveta:	Simax
Densímetro:	Preto
R0 ref	1,0015
C_M	0,0004

G	2,5538
massa do provete, m_w (g)	50
teor em água, w	0,30%
massa seca, m (g)	49,8504

t (min)	t (horas)	hh:mm	Temp (°C)	C _T	Leituras no densímetro R' _h	R' ₀ (medido)	R' ₀ (calculado)	R _d	k (%)	η (mPa.s)	H _r (mm)	d (μm)
0,5		11:10	21,2	0,0002	1,0220	1,0015	1,0009	20,50	67,6	0,973	116,30	66,76
1		11:11		0,0002	1,0205			19,00	62,6	0,973	122,37	48,42
2		11:12		0,0002	1,0190			17,50	57,7	0,973	128,43	35,08
4		11:14		0,0002	1,0150			13,50	44,5	0,973	144,61	26,32
8		11:18		0,0002	1,0130			11,50	37,9	0,973	152,70	19,13
15		11:25	21,2	0,0002	1,0110	1,0015	1,0009	9,50	31,3	0,973	160,79	14,33
30		11:40	21,2	0,0002	1,0100	1,0015	1,0009	8,50	28,0	0,973	164,84	10,26
60	1	12:10	21,3	0,0002	1,0070	1,0015	1,0009	5,50	18,1	0,971	176,97	7,51
120	2	13:10	21,4	0,0002	1,0055	1,0015	1,0009	4,00	13,2	0,969	183,04	5,39
480	8	19:10	21,9	0,0003	1,0045	1,0015	1,0008	3,00	9,9	0,957	187,08	2,71
1440	24	11:10 ⁺¹	21,8	0,0003	1,0030	1,0015	1,0008	1,50	4,9	0,960	193,15	1,59
2880	48	11:10 ⁺²	22,4	0,0004	1,0030	1,0015	1,0007	1,50	4,9	0,946	193,15	1,12

1.3. Curva granulométrica



2. Rejeitos de Mineração 1 (RJ1)

2.1. Peneiração

FRACÇÃO RETIDA NO PENEIRO 2 MM	PENEIROS		MATERIAL RETIDO			MATERIAL QUE PASSA
	Des.	Aberturas (mm)	Massa (g) m_x	% retida $N_x=(m_x/m_t) \times 100$	% acumulada N'_x	% acumulada $N''_x=100-N'_x$
	125 mm	125,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	63 mm	63,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	40 mm	40,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	20 mm	20,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	10 mm	10,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	5 mm	5,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	4 mm	4,00	0,00	0,00	0,00	100,00
	2 mm	2,00	0,00	0,00	0,00	100,00
< 2,00 mm		254,60	100,00			
TOTALS =		254,60				

FRACÇÃO PASSADA NO PENEIRO 2 MM	Massa da amostra a ensaiar (g): $m_b = 254,60$ g					
	PENEIROS		MATERIAL RETIDO			MATERIAL QUE PASSA
	Des.	Aberturas (mm)	Massa (g) m_x	% retida (total) $n_x=(m_x/m_b) \times 100$	% acumulada n'_x	% acumulada $N''_x=n'_x(100-N_{10})/100$
	1 mm	1,000	0,00	0,0	100,0	100,0
	500 μ m	0,500	0,00	0,0	100,0	100,0
	250 μ m	0,250	0,00	0,0	100,0	100,0
	125 μ m	0,125	0,00	0,0	100,0	100,0
	63 μ m	0,063	5,74	2,3	97,7	97,7
	< 63 μ m		248,26	97,5		
	TOTALS =		254,00			

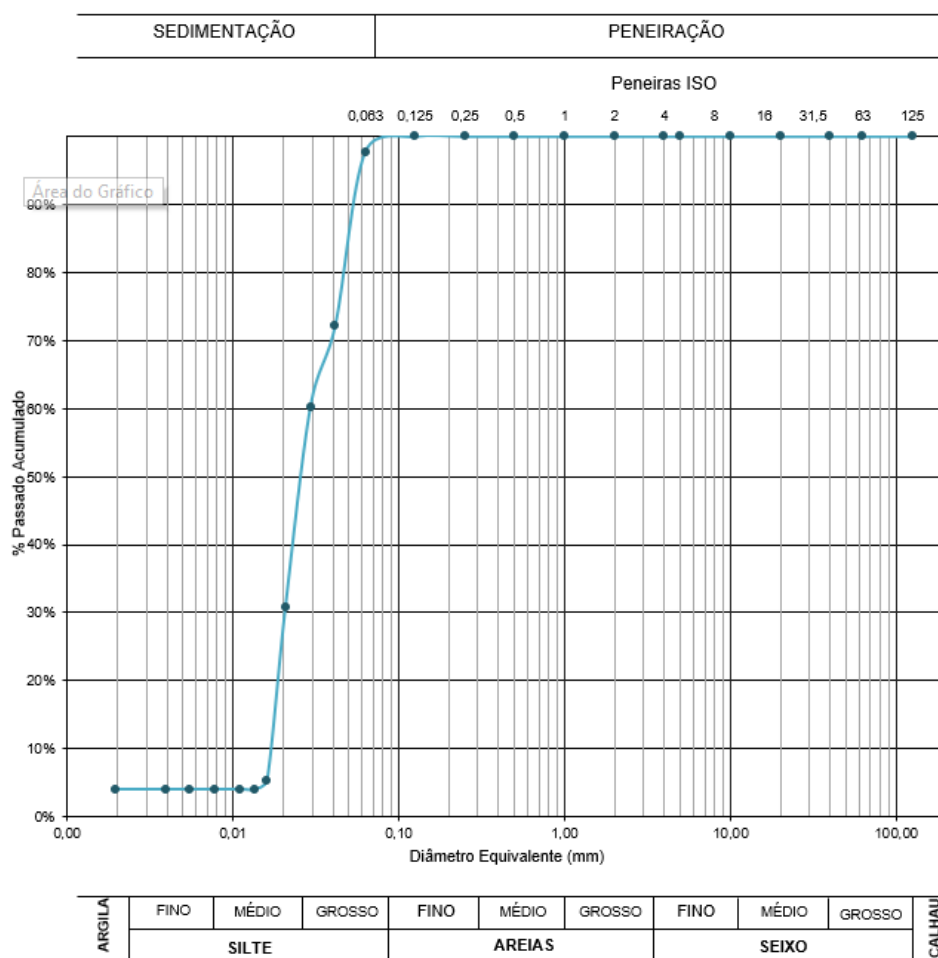
2.2. Sedimentação

Proveta:	Simax
Densímetro:	1
R0 ref	1,0015
C_M	0,0004

G	4,1042
massa do provete, m_w (g)	50
teor em água, w	1,18%
massa seca, m (g)	49,4169

t (min)	t (horas)	hh:mm	Temp (°C)	C _T	Leituras no densímetro R' _h	R' ₀ (medido)	R' ₀ (calculado)	R _d	k (%)	η (mPa.s)	H _r (mm)	d (μm)
0,5		10:05	21,2	0,0002	1,0285	1,0015	1,0009	27,00	72,2	0,973	90,01	41,55
1		10:06		0,0002	1,0285		1,0009	27,00	72,2	0,973	90,01	29,38
2		10:07		0,0002	1,0285		1,0009	27,00	72,2	0,973	90,01	20,78
4		10:09		0,0002	1,0240		1,0009	22,50	60,2	0,973	108,21	16,11
8		10:13		0,0002	1,0130		1,0009	11,50	30,8	0,973	152,70	13,53
15		10:20	21,2	0,0002	1,0035	1,0015	1,0009	2,00	5,4	0,973	191,13	11,06
30		10:35	21,3	0,0002	1,0030	1,0015	1,0009	1,50	4,0	0,971	193,15	7,85
60	1	11:05	21,5	0,0003	1,0030	1,0015	1,0009	1,50	4,0	0,966	193,15	5,54
120	2	12:05	21,6	0,0003	1,0030	1,0015	1,0009	1,50	4,0	0,964	193,15	3,91
480	8	18:05	21,8	0,0003	1,0030	1,0015	1,0008	1,50	4,0	0,960	193,15	1,95
1440	24	10:05 +1	20,7	0,0001	1,0030	1,0015	1,0010	1,50	4,0	0,985	193,15	1,14
2880	48	10:05 +2	21	0,0002	1,0030	1,0015	1,0010	1,50	4,0	0,978	193,15	0,80

2.3. Curva granulométrica



3. Rejeitos de Mineração 2 (RJ2)

3.1. Peneiração

FRACÇÃO RETIDA NO PENEIRO 2 MM	PENEIROS		MATERIAL RETIDO			MATERIAL QUE PASSA
	Des.	Aberturas (mm)	Massa (g) m_x	% retida $N_x=(m_x/m_t) \times 100$	% acumulada N'_x	% acumulada $N''_x=100-N'_x$
	125 mm	125,00	0,00	0,00	0,00	100,00
63 mm	63,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
40 mm	40,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
20 mm	20,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
10 mm	10,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
5 mm	5,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
4 mm	4,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
2 mm	2,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
	< 2,00 mm	161,80	100,00			
	TOTAIS =	161,80				

FRACÇÃO PASSADA NO PENEIRO 2 MM	Massa da amostra a ensaiar (g): $m_b = 161,80$ g					
	PENEIROS		MATERIAL RETIDO			MATERIAL QUE PASSA
	Des.	Aberturas (mm)	Massa (g) m_x	% retida (total) $n_x=(m_x/m_b) \times 100$	% acumulada n'_x	% acumulada $N''_x=n'_x(100-N_{10})/100$
	1 mm	1,000	0,00	0,0	100,0	100,0
	500 μ m	0,500	0,00	0,0	100,0	100,0
	250 μ m	0,250	0,00	0,0	100,0	100,0
	125 μ m	0,125	2,76	1,7	98,3	98,3
	63 μ m	0,063	17,81	11,0	87,3	87,3
	< 63 μ m	141,73	87,6			
	TOTAIS =	162,30				

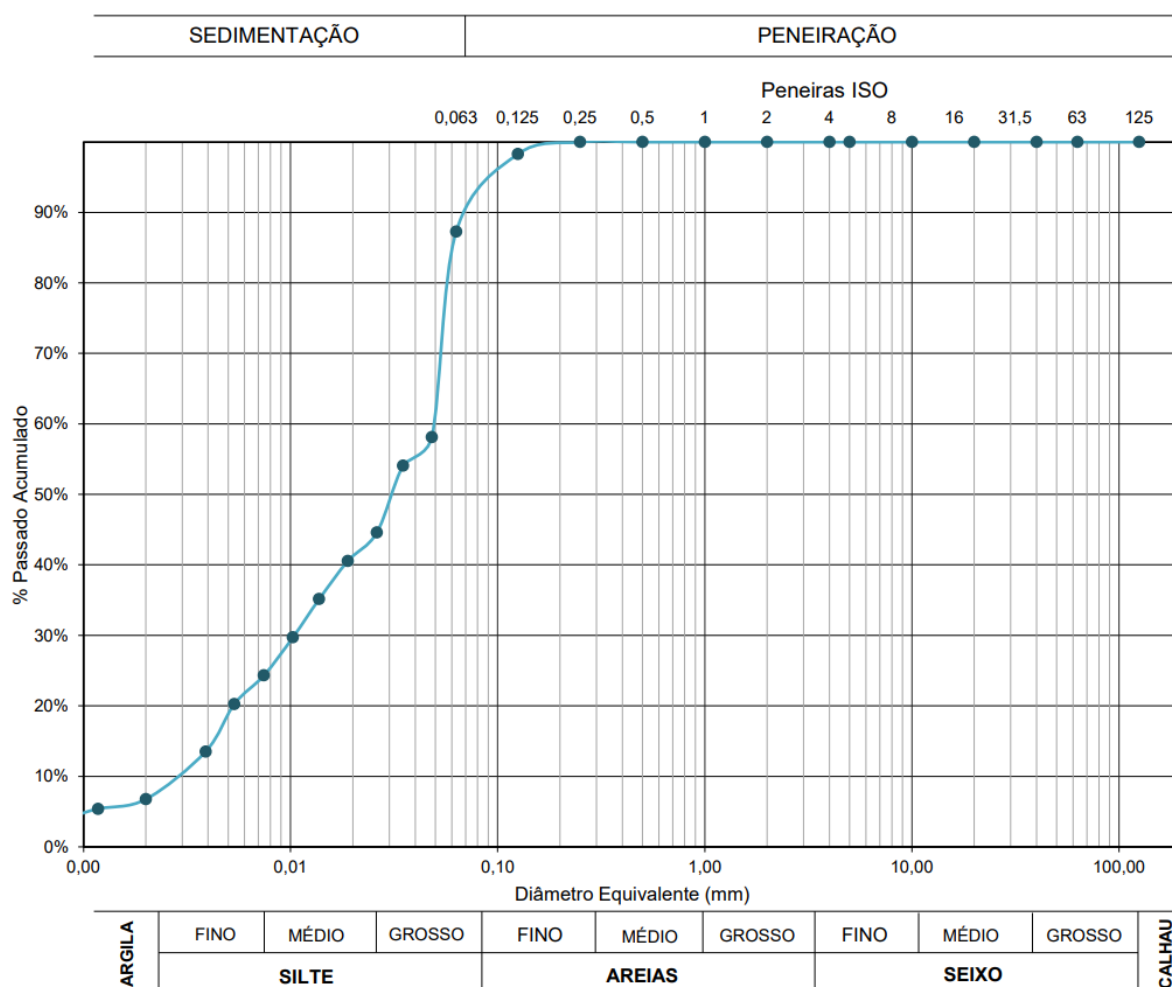
3.2. Sedimentação

Proveta:	Simax
Densímetro:	Preto
R0 ref	1,0015
C_M	0,0004

G	3,8954
massa do provete, m_w (g)	50
teor em água, w	0,49%
massa seca, m (g)	49,7559

t (min)	t (horas)	hh:mm	Temp (°C)	C _T	Leituras no densímetro R' _h	R' ₀ (medido)	R' ₀ (calculado)	R _d	k (%)	η (mPa.s)	H _r (mm)	d (μm)
0,5		10:23	21,2	0,0002	1,0230	1,0015	1,0009	21,50	58,1	0,973	112,25	48,05
1		10:24		0,0002	1,0215			20,00	54,1	0,973	118,32	34,88
2		10:25		0,0002	1,0180			16,50	44,6	0,973	132,48	26,10
4		10:27		0,0002	1,0165			15,00	40,6	0,973	138,54	18,87
8		10:31		0,0002	1,0145			13,00	35,2	0,973	146,63	13,73
15		10:38	21,5	0,0003	1,0125	1,0015	1,0009	11,00	29,7	0,966	154,72	10,26
30		10:53	21,6	0,0003	1,0105	1,0015	1,0009	9,00	24,3	0,964	162,81	7,44
60	1	11:23	21,7	0,0003	1,0090	1,0015	1,0008	7,50	20,3	0,962	168,88	5,35
120	2	12:23	21,8	0,0003	1,0065	1,0015	1,0008	5,00	13,5	0,960	178,99	3,89
480	8	18:23	21,8	0,0003	1,0040	1,0015	1,0008	2,50	6,8	0,960	189,10	2,00
1440	24	10:23 +1	20,7	0,0001	1,0035	1,0015	1,0010	2,00	5,4	0,985	191,13	1,18
2880	48	10:23 +2	21,2	0,0002	1,0030	1,0015	1,0009	1,50	4,1	0,973	193,15	0,83

3.3. Curva granulométrica



ANEXO C – LIMITES DE ATTERBERG SEGUNDO A NORMA PORTUGUESA NP-143:1969

1. Rejeitos de Mineração 1 (RJ1)

1.1. Limite de Liquidez (LL)

NÚMERO DO PROVETE			1	2	3	4
m_1	Massa da cápsula	g	11,071	10,899	10,989	16,362
m_2	Massa da cápsula + Solo úmido	g	21,274	18,112	20,332	25,385
m_3	Massa da cápsula + Solo seco	g	19,448	16,907	18,713	23,909
$W_s=m_3-m_1$	Massa do solo seco	g	8,3767	6,0081	7,7235	7,5470
$W_w=m_2-m_3$	Massa da água	g	1,8263	1,2049	1,6195	1,4760
$w=(W_w/W_s) \times 100$	Teor em água	%	21,8021	20,0546	20,9685	19,5574
N - NÚMERO DE PANCADAS			21	39	22	30

1.2. Limite de Plasticidade (LP)

NÚMERO DO PROVETE			1	2	3	4
m_1	Massa da cápsula	g	10,887	16,273	10,816	16,346
m_2	Massa da cápsula + Solo úmido	g	13,269	17,535	11,557	18,168
m_3	Massa da cápsula + Solo seco	g	12,859	17,315	11,431	17,859
$W_s=m_3-m_1$	Massa do solo seco	g	1,973	1,042	0,615	1,513
$W_w=m_2-m_3$	Massa da água	g	0,410	0,219	0,127	0,310
$w=(W_w/W_s) \times 100$	Teor em água	%	20,784	21,054	20,612	20,469
MÉDIA DOS TEORES EM ÁGUA			20,7296			

2. Rejeitos de Mineração 2 (RJ2)

2.1. Limite de Liquidez (LL)

NÚMERO DO PROVETE			1	2	3	4
m_1	Massa da cápsula	g	10,9238	11,1234	15,8556	17,2934
m_2	Massa da cápsula + Solo úmido	g	23,5500	23,2457	28,0815	30,3216
m_3	Massa da cápsula + Solo seco	g	21,4296	21,3519	26,0683	28,2997
$W_s=m_3-m_1$	Massa do solo seco	g	10,5058	10,2285	10,2127	11,0063
$W_w=m_2-m_3$	Massa da água	g	2,1204	1,8938	2,0132	2,0219
$w=(W_w/W_s) \times 100$	Teor em água	%	20,1831	18,5149	19,7127	18,3704
N - NÚMERO DE PANCADAS			17	33	19	38

2.2. Limite de Plasticidade (LP)

NÚMERO DO PROVETE			1	2	3	4
m_1	Massa da cápsula	g	13,378	11,012	13,313	13,335
m_2	Massa da cápsula + Solo úmido	g	15,105	11,903	14,993	14,357
m_3	Massa da cápsula + Solo seco	g	14,804	11,758	14,707	14,195
$W_s=m_3-m_1$	Massa do solo seco	g	1,426	0,745	1,395	0,859
$W_w=m_2-m_3$	Massa da água	g	0,301	0,145	0,286	0,163
$w=(W_w/W_s) \times 100$	Teor em água	%	21,125	19,512	20,476	18,911
MÉDIA DOS TEORES EM ÁGUA			20,0058			

ANEXO D – PAPEL FILTRO SEGUNDO A NORMA AMERICANA ASTM D5298:2003

1. Teor de umidade - preparação

MATERIAL	NÚMERO DO PROVETE	m_1	m_2	m_3	$W_u = m_2 - m_1$	$W_s = m_3 - m_1$	$W_w = m_2 - m_3$	$w = (W_w / W_s) \times 100$
		Massa da cápsula	Massa da cápsula + Solo úmido	Massa da cápsula + Solo seco	Massa do solo úmido	Massa do solo seco	Massa da água	Teor em água
		g	g	g	g	g	g	%
PP	1	13,2942	40,7822	30,7494	27,4880	17,4552	10,0328	57,48%
	2	11,0451	22,5963	19,5337	11,5512	8,4886	3,0626	36,08%
	3	10,9368	29,4296	23,0902	18,4928	12,1534	6,3394	52,16%
	4	102,6000	193,8000	172,6000	91,2000	70,0000	21,2000	30,29%
	5	174,1000	278,7000	259,6000	104,6000	85,5000	19,1000	22,34%
	6	195,8000	282,4000	270,8000	86,6000	75,0000	11,6000	15,47%
	7	179,7000	263,6000	255,8000	83,9000	76,1000	7,8000	10,25%
	8	315,7000	408,9000	402,6000	93,2000	86,9000	6,3000	7,25%
RJ1	1	11,0557	33,2376	28,2240	22,1819	17,1683	5,0136	29,20%
	2	16,4017	36,9684	33,1879	20,5667	16,7862	3,7805	22,52%
	3	13,3459	35,3756	30,8280	22,0297	17,4821	4,5476	26,01%
	4	17,2879	48,8022	41,3430	31,5143	24,0551	7,4592	31,01%
	5	98,7000	220,5000	209,7000	121,8000	111,0000	10,8000	9,73%
	6	96,0000	230,4000	217,3000	134,4000	121,3000	13,1000	10,80%
	7	100,8000	236,6000	219,3000	135,8000	118,5000	17,3000	14,60%
	8	102,6000	241,7000	234,8000	139,1000	132,2000	6,9000	5,22%
RJ2	1	10,7835	45,7597	39,5837	34,9762	28,8002	6,1760	21,44%
	2	11,0622	41,6037	36,1518	30,5415	25,0896	5,4519	21,73%
	3	13,3564	51,4531	42,2192	38,0967	28,8628	9,2339	31,99%
	4	10,8900	27,0003	23,8227	16,1103	12,9327	3,1776	24,57%
	5				166,8000	137,5000	29,3000	21,31%
	6	100,8000	223,4000	207,1000	122,6000	106,3000	16,3000	15,33%
	7	108,7000	221,8000	211,2000	113,1000	102,5000	10,6000	10,34%
	8	98,6000	212,9000	204,1000	114,3000	105,5000	8,8000	8,34%
	9	96,0000	205,8000	199,8000	109,8000	103,8000	6,0000	5,78%

Nota: O quadro vazio corresponde ao provete montado diretamente sobre o conjunto balança e cápsula, não sendo necessária as correções devido a tara do equipamento – balança.

2. Pó de Pedra (PP)

MATERIAL	NÚMERO DO PROVETE	CÓDIGO DA AMOSTRA	Data de molde:	Data de desmolde:	t	w _i	MOLDE			DESMOLDE					w _f	ψ	
					Duração:	Teor de umidade inicial:	Massa da cápsula inicial:	Massa do solo úmido inicial:	Massa do papel filtro seco:	Massa da cápsula final:	Massa do solo úmido final:	Massa do solo seco final:	Massa da água final:	Massa do papel filtro úmido:	Teor de umidade final:	Umidade do papel filtro:	Sucção do papel filtro:
					dias	%	g	g	g	g	g	g	g	g	%	%	kPa
PP	1	1.1	10/mai	13/mai	3	57,48%	6,64	35,33	0,38	10,91	31,17	21,44	9,73	1,07	45,36%	182,45%	0,89
		1.2	10/mai	16/mai	6	57,48%	6,64	39,53	0,38	16,55	33,01	22,36	10,65	1,03	47,64%	169,28%	1,34
		1.3	10/mai	17/mai	7	57,48%	6,64	35,09	0,38	11,12	31,20	21,54	9,66	1,05	44,85%	177,96%	1,02
		1.4	10/mai	23/mai	13	57,48%	6,64	33,09	0,38	16,22	29,77	20,67	9,10	0,93	44,04%	148,14%	2,58
		1.5	10/mai	25/mai	15	57,48%	6,64	29,06	0,38	16,25	25,89	18,06	7,83	0,79	43,37%	110,41%	8,34
	2	2.1	13/mai	16/mai	3	36,08%	6,65	12,55	0,38	10,81	11,78	9,09	2,70	0,64	29,69%	70,60%	28,77
		2.2	13/mai	18/mai	5	36,08%	6,65	10,59	0,37	10,92	9,84	7,66	2,18	0,63	28,41%	68,25%	30,94
		2.3	13/mai	23/mai	10	36,08%	6,65	13,25	0,37	13,36	12,16	9,53	2,63	0,66	27,55%	77,94%	22,90
		2.4	13/mai	28/mai	15	36,08%	6,65	12,55	0,38	13,37	11,56	9,24	2,32	0,63	25,09%	65,47%	33,74
		2.5	13/mai	02/jun	20	36,08%	6,65	14,02	0,38	15,84	12,43	10,30	2,12	0,62	20,61%	62,59%	36,91
	3	3.1	13/mai	16/mai	3	52,16%	6,65	21,27	0,39	11,11	19,48	13,43	6,05	0,95	45,02%	143,65%	2,97
		3.2	13/mai	18/mai	5	52,16%	6,65	26,52	0,40	11,04	23,91	16,42	7,49	1,05	45,59%	164,75%	1,54
		3.3	13/mai	23/mai	10	52,16%	6,65	29,55	0,38	13,37	27,01	18,41	8,61	0,96	46,75%	150,25%	2,42
		3.4	13/mai	28/mai	15	52,16%	6,65	26,02	0,38	13,38	23,40	16,23	7,17	0,75	44,19%	94,83%	13,55
		3.5	13/mai	02/jun	20	52,16%	6,65	26,03	0,40	16,26	23,28	16,36	6,92	0,81	42,30%	105,50%	9,72
	4	4.1	17/jun	24/jun	7	30,29%	0,39	12,19	0,41	10,89	11,34	9,26	2,08	0,63	22,44%	54,16%	47,96
		4.2	17/jun	27/jun	10	30,29%	0,39	11,34	0,38	10,90	10,28	8,59	1,69	0,57	19,65%	48,85%	56,55
	5	5.1	17/jun	24/jun	7	22,34%	0,42	7,77	0,39	13,28	7,13	6,27	0,86	0,55	13,80%	39,69%	171,73
		5.2	17/jun	27/jun	10	22,34%	0,39	13,49	0,38	13,28	12,59	10,85	1,75	0,54	16,09%	39,78%	169,06
	6	6.1	17/jun	24/jun	7	15,47%	0,38	10,29	0,40	11,00	9,60	8,86	0,75	0,55	8,44%	35,56%	360,26
6.2		17/jun	27/jun	10	15,47%	0,42	11,82	0,38	11,01	10,98	10,21	0,77	0,48	7,54%	25,80%	2075,58	
7	7.1	17/jun	24/jun	7	10,25%	0,40	13,08	0,38	10,71	12,35	11,72	0,64	0,48	5,43%	25,28%	2278,52	
	7.2	17/jun	27/jun	10	10,25%	0,38	12,01	0,39	10,72	11,24	10,81	0,43	0,48	3,99%	23,38%	3203,88	
8	8.1	17/jun	24/jun	7	7,25%	0,38	10,66	0,40	13,30	10,18	9,96	0,22	0,48	2,17%	19,47%	6463,21	
	8.2	17/jun	27/jun	10	7,25%	0,38	10,51	0,41	13,31	9,94	9,85	0,09	0,46	0,92%	14,54%	15654,64	

3. Rejeitos de Mineração 1 (RJ1)

MATERIAL	NÚMERO DO PROVETE	CÓDIGO DA AMOSTRA	Data de molde:	Data de desmolde:	t	w _i	MOLDE			DESMOLDE					w _f	ψ	
					Duração:	Teor de umidade inicial:	Massa da cápsula inicial:	Massa do solo úmido inicial:	Massa do papel filtro seco:	Massa da cápsula final:	Massa do solo úmido final:	Massa do solo seco final:	Massa da água final:	Massa do papel filtro úmido:	Teor de umidade final:	Umidade do papel filtro:	Sucção do papel filtro:
					dias	%	g	g	g	g	g	g	g	g	%	%	kPa
RJ1	1	1.1	10/mai	13/mai	3	29,20%	6,64	54,34	0,38	16,25	51,73	41,14	10,60	1,01	25,76%	164,65%	1,55
		1.2	10/mai	16/mai	6	29,20%	6,64	51,41	0,38	16,28	48,97	38,90	10,07	0,94	25,88%	151,57%	2,32
		1.3	10/mai	17/mai	7	29,20%	6,64	67,20	0,38	15,84	64,31	50,94	13,37	1,01	26,25%	167,13%	1,43
		1.4	10/mai	23/mai	13	29,20%	6,64	54,95	0,37	16,38	51,74	41,22	10,53	0,96	25,54%	158,52%	1,87
		1.5	10/mai	25/mai	15	29,20%	6,64	55,36	0,37	16,39	52,45	41,79	10,66	0,96	25,51%	163,49%	1,60
	2	2.1	13/mai	16/mai	3	22,52%	6,65	30,37	0,38	15,84	29,43	24,51	4,92	0,67	20,09%	76,95%	23,62
		2.2	13/mai	18/mai	5	22,52%	6,65	24,73	0,38	13,37	23,94	19,98	3,96	0,62	19,80%	63,59%	35,77
		2.3	13/mai	23/mai	10	22,52%	6,65	24,54	0,37	10,97	23,75	19,95	3,79	0,53	19,01%	40,46%	149,71
		2.4	13/mai	28/mai	15	22,52%	6,65	30,87	0,39	10,97	29,91	25,19	4,73	0,51	18,77%	33,58%	513,78
		2.5	13/mai	02/jun	20	22,52%	6,65	27,32	0,36	11,04	26,10	22,49	3,61	0,46	16,05%	26,67%	1775,75
	3	3.1	13/mai	16/mai	3	26,01%	6,65	29,12	0,37	11,07	27,91	22,89	5,02	0,80	21,93%	115,16%	7,20
		3.2	13/mai	18/mai	5	26,01%	6,65	28,02	0,37	10,91	26,74	22,02	4,72	0,75	21,42%	103,49%	10,35
		3.3	13/mai	23/mai	10	26,01%	6,65	38,62	0,37	11,14	37,38	30,52	6,86	0,73	22,47%	93,88%	13,95
		3.4	13/mai	28/mai	15	26,01%	6,65	34,76	0,39	11,14	33,17	27,22	5,95	0,69	21,86%	78,38%	22,58
		3.5	13/mai	02/jun	20	26,01%	6,65	32,72	0,37	16,36	30,97	26,99	3,98	0,56	14,75%	49,10%	56,12
	4	4.1	13/mai	16/mai	3	31,01%	6,65	41,29	0,37	13,36	39,05	30,88	8,17	1,00	26,45%	172,41%	1,21
		4.2	13/mai	18/mai	5	31,01%	6,65	34,24	0,37	16,28	31,77	25,29	6,48	0,96	25,61%	158,55%	1,87
		4.3	13/mai	23/mai	10	31,01%	6,65	39,37	0,38	10,82	36,78	29,21	7,57	0,88	25,90%	132,93%	4,14
		4.4	13/mai	28/mai	15	31,01%	6,65	44,84	0,38	10,82	42,04	33,35	8,69	0,85	26,06%	124,49%	5,39
		4.5	13/mai	02/jun	20	31,01%	6,65	50,92	0,37	10,92	47,19	40,40	6,79	0,80	16,81%	115,68%	7,09
	5	5.1	15/jun	22/jun	7	9,73%	0,47	18,80	0,39	10,88	18,43	16,80	1,63	0,45	9,71%	16,72%	10583,32
		5.2	15/jun	24/jun	9	9,73%	0,39	19,54	0,39	10,88	18,88	17,62	1,26	0,45	7,12%	15,71%	12682,34
	6	6.1	15/jun	22/jun	7	10,80%	0,40	23,98	0,39	11,01	23,53	21,50	2,03	0,46	9,46%	18,26%	8025,61
		6.2	15/jun	24/jun	9	10,80%	0,41	22,33	0,39	11,04	21,70	19,91	1,79	0,46	9,00%	18,52%	7656,56
7	7.1	15/jun	22/jun	7	14,60%	0,42	19,38	0,40	16,28	18,96	16,79	2,17	0,47	12,91%	16,88%	10284,50	
	7.2	15/jun	24/jun	9	14,60%	0,43	17,49	0,40	16,30	16,95	15,08	1,87	0,47	12,40%	17,16%	9785,33	
8	8.1	15/jun	22/jun	7	5,22%	0,39	17,84	0,38	16,32	17,69	16,86	0,84	0,42	4,98%	9,41%	39231,22	
	8.2	15/jun	24/jun	9	5,22%	0,36	12,27	0,40	16,34	12,07	11,51	0,56	0,44	4,91%	11,12%	28878,67	

4. Rejeitos de Mineração 2 (RJ2)

MATERIAL	NÚMERO DO PROVETE	CÓDIGO DA AMOSTRA	Data de molde:	Data de desmolde:	t	w _i	MOLDE			DESMOLDE					w _f	ψ		
					Duração:	Teor de umidade inicial:	Massa da cápsula inicial:	Massa do solo úmido inicial:	Massa do papel filtro seco:	Massa da cápsula final:	Massa do solo úmido final:	Massa do solo seco final:	Massa da água final:	Massa do papel filtro úmido:	Teor de umidade final:	Umidade do papel filtro:	Sucção do papel filtro:	
					dias	%	g	g	g	g	g	g	g	g	%	%	kPa	
RJ2	1	1.1	10/mai	13/mai	3	21,44%	6,64	39,32	0,38	16,30	38,68	32,38	6,30	0,61	19,45%	62,54%	36,95	
		1.2	10/mai	16/mai	6	21,44%	6,64	31,08	0,37	13,51	30,46	25,54	4,92	0,57	19,25%	53,05%	49,63	
		1.3	10/mai	17/mai	7	21,44%	6,64	27,86	0,37	13,35	27,30	23,08	4,22	0,53	18,27%	41,60%	121,91	
		1.4	10/mai	23/mai	13	21,44%	6,64	30,35	0,38	16,12	28,42	24,04	4,38	0,54	18,20%	42,84%	97,64	
		1.5	10/mai	25/mai	15	21,44%	6,64	32,14	0,38	16,12	30,91	26,12	4,79	0,52	18,34%	36,55%	301,62	
	2	2.1	10/mai	13/mai	3	21,73%	6,64	47,34	0,38	16,37	45,91	38,80	7,11	0,91	18,34%	139,19%	3,41	
		2.2	10/mai	16/mai	6	21,73%	6,64	43,05	0,38	16,49	41,70	35,15	6,54	0,88	18,61%	131,56%	4,32	
		2.3	10/mai	17/mai	7	21,73%	6,64	44,16	0,38	11,12	42,53	35,76	6,77	0,91	18,94%	139,58%	3,37	
		2.4	10/mai	23/mai	13	21,73%	6,64	44,52	0,38	16,40	42,80	36,06	6,74	0,81	18,68%	115,45%	7,14	
		2.5	10/mai	25/mai	15	21,73%	6,64	42,55	0,39	16,41	40,99	34,44	6,55	0,79	19,01%	103,77%	10,26	
	3	3.1	10/mai	13/mai	3	31,99%	6,64	41,65	0,38	16,12	34,66	27,78	6,88	1,05	24,78%	173,57%	1,17	
		3.2	10/mai	16/mai	6	31,99%	6,64	43,94	0,38	11,13	36,34	29,30	7,04	1,08	24,03%	184,69%	0,83	
		3.3	10/mai	17/mai	7	31,99%	6,64	46,85	0,39	16,35	37,88	30,24	7,64	1,00	25,26%	160,16%	1,78	
		3.4	10/mai	23/mai	13	31,99%	6,64	51,63	0,38	10,89	42,57	34,22	8,36	0,98	24,43%	157,14%	1,95	
		3.5	10/mai	25/mai	15	31,99%	6,64	56,50	0,36	10,98	47,21	38,00	9,20	0,94	24,22%	162,94%	1,63	
	4	4.1	13/mai	16/mai	3	24,57%	6,65	37,14	0,38	13,38	35,46	29,48	5,97	1,02	20,26%	167,69%	1,41	
		4.2	13/mai	18/mai	5	24,57%	6,65	33,36	0,38	11,03	31,47	26,32	5,15	1,00	19,55%	160,72%	1,75	
		4.3	13/mai	23/mai	10	24,57%	6,65	42,48	0,37	17,31	40,05	33,21	6,84	0,95	20,60%	155,72%	2,04	
		4.4	13/mai	28/mai	15	24,57%	6,65	43,25	0,38	17,34	40,85	34,08	6,77	0,91	19,88%	141,93%	3,13	
		4.5	13/mai	02/jun	20	24,57%	6,65	31,52	0,38	10,91	29,21	24,67	4,53	0,61	18,38%	60,21%	39,73	
	5	5.1	07/jun	13/jun	6	21,31%				0,37	10,92	38,11	32,53	5,58	0,51	17,14%	39,69%	171,72
		5.2	07/jun	13/jun	6	21,31%				0,36	11,00	48,71	41,16	7,55	0,55	18,35%	53,17%	49,46
	6	6.1	17/jun	24/jun	7	15,33%	0,38	19,61	0,39	10,85	18,97	16,79	2,18	0,50	13,01%	27,13%	1634,86	
		6.2	17/jun	27/jun	10	15,33%	0,39	25,46	0,39	10,86	24,45	21,82	2,63	0,50	12,06%	28,88%	1195,10	
	7	7.1	17/jun	24/jun	7	10,34%	0,40	15,44	0,38	17,28	14,66	13,79	0,86	0,50	6,26%	29,47%	1073,83	
		7.2	17/jun	27/jun	10	10,34%	0,41	15,02	0,38	17,28	14,00	13,27	0,73	0,48	5,50%	25,46%	2205,66	
	8	8.1	17/jun	24/jun	7	8,34%	0,39	14,51	0,39	11,10	13,77	13,13	0,64	0,49	4,84%	23,76%	2994,36	
		8.2	17/jun	27/jun	10	8,34%	0,38	13,98	0,39	11,11	13,16	12,75	0,41	0,49	3,23%	24,51%	2614,18	
9	9.1	17/jun	24/jun	7	5,78%	0,38	16,24	0,41	15,79	15,61	15,23	0,37	0,51	2,44%	22,82%	3544,09		
	9.2	17/jun	27/jun	10	5,78%	0,42	15,64	0,40	15,79	14,94	14,70	0,24	0,45	1,64%	14,71%	15168,70		

Nota: Os quadros vazios correspondem às amostras moldadas diretamente sobre o conjunto balança e cápsula, não sendo necessária as correções devido a tara do equipamento – balança.