



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Preparação laboratorial de provetes de rejeitados mineiros

Alice Maria Scalabrim

Dissertação

Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Nuno Pereira Raposo
Professor Doutor Danilo Rinaldi Bisconsini

Março de 2023



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Preparação laboratorial de provetes de rejeitados mineiros

Alice Maria Scalabrim

Dissertação

Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor Nuno Pereira Raposo
Professor Doutor Danilo Rinaldi Bisconsini

Março de 2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma na concretização da presente dissertação de mestrado. Sem elas muito dificilmente o objetivo final seria atingido.

Ao meu orientador, Professor Nuno Raposo, e meu coorientador, Professor Danilo Rinaldi, pela ajuda prestada ao longo destes meses, pelos ensinamentos e a oportunidade proporcionada durante a realização deste trabalho.

Ao programa de iniciação científica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que despertou em mim o amor pela pesquisa, em especial ao Professor José Ilo Pereira e à Claudia Baldin por todo o conhecimento compartilhado e os anos de trabalho conjunto no laboratório.

Àqueles que cruzaram meu caminho na minha jornada acadêmica. Aos meus amigos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em especial a Karen, Waleska, Laura e Liza, pela amizade durante todos esses anos. Aos meus colegas de dupla-diplomação por terem compartilhado desta experiência única comigo no Instituto Politécnico de Viseu, em especial à Eloisa e Catarina. Ao meu primo João, por ser minha segurança estando tão longe de casa. E também ao Hiago pela ajuda, motivação e inspiração todos os dias.

À toda minha família, em especial aos meus pais, Ana e Sandro, por me permitirem me dedicar aos meus sonhos por todos esses anos, pelo apoio, força, e cuidado que sempre tiveram comigo. E também à minha irmã, Natalia, minha melhor amiga, por sempre me entender tão bem e estar ao meu lado em todas as minhas decisões.

A todos, meu muito obrigada!

RESUMO

A exploração mineira é uma atividade que explora os recursos minerais do solo ou subsolo e engloba todos os processos, atividades e indústrias ligados à extração de substâncias minerais a partir de depósitos ou massas minerais no solo ou subsolo. A criação de resíduos resultantes da atividade mineira é inevitável e, na maioria das explorações, corresponde a cerca de 90 a 99% do total de material extraído do terreno.

Ensaio com provetes homogêneos sob estados uniformes de tensão e deformação são necessários para estudos de caracterização das propriedades do solo. Sendo inviável obter amostras indeformadas de rejeitados, a sua caracterização terá que ser efetuada em provetes reconstruídos. É, portanto, premente o desenvolvimento de técnicas e metodologias que permitam criar provetes que consigam reproduzir o comportamento real dos rejeitados existentes nas instalações de deposição de rejeitados.

Na primeira parte do trabalho, faz-se uma introdução aos rejeitados mineiros, explicando como são produzidos, processados e depositados. A seguir é feita uma revisão bibliográfica sobre o fenómeno da liquefação e sobre os ensaios triaxiais. Por fim são analisados diferentes métodos de reconstituição de provetes para o ensaio triaxial, dando ênfase ao método de deposição em polpa.

Na segunda parte, foram realizados ensaios laboratoriais com o objetivo de caracterizar o comportamento de três materiais distintos: um rejeitado de mineração (RJ1), pó de pedra 1 (PP1) e pó de pedra 2 (PP2). Por meio dos ensaios foi possível determinar a granulometria dos materiais, recorrendo à peneiração e sedimentação, os limites de Atterberg e as densidades de partículas sólidas.

Por fim foi desenvolvida e testada uma nova técnica, com o objetivo de criar um provete capaz de reproduzir as características dos rejeitados nos locais de deposição. Esta técnica se baseou no método de deposição em polpa. Um molde bipartido de metal foi desenvolvido para auxiliar na reconstituição dos provetes. Tentativas de reconstituição de provetes foram realizadas utilizando os três materiais citados acima e testes foram utilizados para fazer a análise da qualidade dos provetes.

Palavras-chave: Rejeitados de mineração; Reconstituição de provetes; Ensaio triaxial

ABSTRACT

Mining is an activity that exploits the mineral resources of the soil or subsoil and encompasses all processes, activities and industries related to the extraction of mineral substances from deposits or mineral masses in the soil or subsoil. The creation of waste resulting from mining activity is inevitable and, in most explorations, it corresponds to about 90 to 99% of the total material extracted from the land.

Tests with homogeneous tests under uniform states of stress and strain are necessary for characterization studies of soil properties. Since it is not feasible to obtain undisturbed samples from mine tailings, their characterization will have to be carried out in reconstructed specimens. It is, therefore, urgent to develop techniques and methodologies that allow the creation of specimens that can reproduce the real behavior of existing tailings in tailings disposal facilities.

In the first part of the work, there is an introduction to mining tailings, explaining how they are produced, processed and deposited. Next, a bibliographic review is made on the phenomenon of liquefaction and on triaxial tests. Finally, different methods of reconstitution of specimens for the triaxial test are analyzed, with emphasis on the method of slurry deposition.

In the second part, several laboratory tests were carried out with the objective of characterizing the behavior of three different materials: a mining tailing (RJ1), stone dust 1 (PP1) and stone dust 2 (PP2). Through the tests, it was possible to determine the granulometry of the materials, using sieving and sedimentation, the Atterberg limits and solid particle densities.

Finally, a new technique was developed with the aim of creating a specimen capable of reproducing the characteristics of the rejects at the deposition sites. This technique is based on the pulp deposition method. A bipartite metal mold was developed to assist in the reconstitution of proceeds. Evidence reconstitution attempts were made using the three materials mentioned above and tests were used to analyze the quality of the evidence.

Keywords: Mining tailings; Reconstitution of specimens; Triaxial test.

ÍNDICE GERAL

| | |
|---|-----------|
| ÍNDICE GERAL..... | viii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | x |
| ÍNDICE DE TABELAS..... | xiii |
| SIMBOLOGIA..... | xiv |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Contextualização | 1 |
| 1.2 Objetivos | 3 |
| 1.3 Estrutura da dissertação | 3 |
| 2. ESTADO DA ARTE | 5 |
| 2.1. Produção e Espessamento de Rejeitados | 6 |
| 2.1.1 Rejeitado sob a forma de Polpa | 8 |
| 2.1.2 Rejeitado Espessado | 9 |
| 2.2. Liquefação | 14 |
| 2.3. Ensaio Triaxial | 18 |
| 2.4. Métodos de Reconstituição de Provetes para o Ensaio Triaxial | 20 |
| 2.4.1 Método de Compactação com Pilão (MT) | 22 |
| 2.4.2 Método de Pluviação ao Ar (AP) | 23 |
| 2.4.3 Método de Deposição em Água (WP) | 24 |
| 2.4.4 Método de Deposição em Polpa (Slurry Deposition, SD) | 26 |
| 3. PROPRIEDADES BÁSICAS DOS MATERIAIS | 39 |
| 3.1. Origem dos Materiais | 39 |
| 3.2. Análise Granulométrica | 40 |
| 3.3.2 Peneiração..... | 41 |
| 3.3.3 Sedimentação | 43 |
| 3.3.4 Resultados e Análise | 45 |
| 3.3. Limites de Atterberg | 47 |
| 3.4. Densidade de Partículas Sólidas | 51 |
| 4. RECONSTITUIÇÃO DE PROVETES | 57 |
| 4.1. Molde bipartido | 57 |
| 4.2. Primeira tentativa de reconstituição | 60 |
| 4.3. Segunda tentativa de reconstituição | 66 |
| 4.4. Terceira tentativa de reconstituição | 73 |
| 4.5. Quarta tentativa de reconstituição | 79 |
| 4.6. Quinta tentativa de reconstituição | 81 |
| 5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS | 85 |

| | |
|--------------------------|------------|
| REFERÊNCIAS | 87 |
| ANEXO A | 91 |
| ANEXO B | 93 |
| ANEXO C | 99 |
| ANEXO D | 101 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Mina de Morenci, Arizona, EUA (Wikimedia Commons, 2012)..... | 6 |
| Figura 2 - Processos de exploração de minério bruto (Raposo, 2016). | 7 |
| Figura 3 - Deposição de rejeitado sob a forma de polpa em barragem convencional (França & Trampus, 2018)..... | 8 |
| Figura 4 - Espessador de cone profundo (Oliveira, 2011) | 10 |
| Figura 5 - Espessador (Vick, 1990) | 11 |
| Figura 6 - Esquema de um hidrociclone mostrando suas principais partes e fluxos, adaptado de Vega-Garcia et al. (2018)..... | 12 |
| Figura 7 - Comparação entre os métodos de deposição convencional e em pastas, adaptado de Tessarotto (2015)..... | 13 |
| Figura 8 - O fenómeno da liquefação: a) antes da liquefação; b) durante a liquefação; c) após a liquefação (Matos Fernandes, 2011)..... | 16 |
| Figura 9 - Etapas da liquefação (Pereira, 2005)..... | 17 |
| Figura 10 - Pormenor da célula triaxial (Matos Fernandes, 2011). | 18 |
| Figura 11 - Ilustração esquemática do método MT, adaptado de Sze & Yang (2014)... | 23 |
| Figura 12 – Ilustração esquemática do método AP, adaptado de Wood (2008)..... | 24 |
| Figura 13 - Ilustração esquemática do método WP, adaptado de Wood (2008)..... | 25 |
| Figura 14 - Método para preparação de provetes, adaptado de Kuerbis & Vaid (1988). | 27 |
| Figura 15 - Procedimento para deposição em polpa, adaptado de Carraro & Prezzi (2008)..... | 32 |
| Figura 16 - Procedimentos do método SD desenvolvido por Corrêa (Corrêa, 2018).... | 34 |
| Figura 17 - Densidade seca dos provetes ensaiados x densidade total da polpa, (Corrêa, 2018). | 35 |
| Figura 18 - Equipamento para reconstituição de provetes (Jorge, 2020)..... | 36 |
| Figura 19 - Aspeto final do provete reconstituído (Jorge, 2020). | 37 |
| Figura 20 – Rejeitado 1 (RJ1) | 40 |
| Figura 21 - Pó de pedra 1 (PP1) e Pó de Pedra 2 (PP2), respetivamente..... | 40 |
| Figura 22 - Procedimento executado para a peneiração, adaptado de ISO/TS 17892- 4:2004 (CEN, 2004b)..... | 41 |
| Figura 23 - Peneiração com o auxílio de agitador mecânico | 42 |
| Figura 24 - Proвете sendo misturado com o auxílio de misturador mecânico..... | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 25 - Provete sendo lavado no peneiro de 63 μm | 44 |
| Figura 26 – Análise granulométrica por sedimentação do rejeitado RJ1: a) no início da contagem dos tempos; b) 15 min após o início da contagem..... | 45 |
| Figura 27 - Gráfico das granulometrias dos materiais RJ1, PP1 E PP2..... | 47 |
| Figura 28 - Ensaio de limite de liquidez na Concha de Casagrande do material PP2 | 48 |
| Figura 29 - Ensaio de limite de plasticidade do rejeitado RJ1 | 49 |
| Figura 30 - Gráfico do resultado do ensaio do limite de liquidez do RJ1..... | 50 |
| Figura 31 - Picnómetros utilizados para determinação da densidade de partículas sólidas | 51 |
| Figura 32 – Remoção de bolhas com o auxílio da bomba de vácuo..... | 52 |
| Figura 33 - Execução do ensaio de determinação da densidade de partículas sólidas.... | 53 |
| Figura 34 – Aferição da massa do conjunto picnómetro + provete + água destilada | 53 |
| Figura 35 - Dimensões do molde bipartido..... | 58 |
| Figura 36 - Modelo em 3D do molde bipartido | 58 |
| Figura 37 - Molde bipartido fabricado em alumínio..... | 59 |
| Figura 38 -Pesagem e mistura do material: a) material seco; b) após mistura com água. | 60 |
| Figura 39 - Molde preparado com pedra porosa e membrana | 60 |
| Figura 40 - Montagem do conjunto para sedimentação do PROV1: a) molde com membrana e material; b) com tubo metálico encaixado | 61 |
| Figura 41 - Provete PROV1 após o desmolde, sobre uma camada de água..... | 62 |
| Figura 42 - Provete PROV1 no dia seguinte ao desmolde..... | 62 |
| Figura 43 - Ensaio de penetração com agulha no PROV1 | 63 |
| Figura 44 - PROV1 após 14 dias: a) fundo com presença de vazios; b) aspecto externo com presença de bolhas..... | 63 |
| Figura 45 - Corte de cilindro para determinação do índice de vazios: a) espátula utilizada para corte; b) cilindro fraturado após corte | 64 |
| Figura 46 - Tubo de PVC utilizado..... | 66 |
| Figura 47 - Montagem do conjunto para sedimentação do PROV2: a) pormenor da ligação molde-tubo; b) conjunto completo e funil..... | 67 |
| Figura 48 - Retirada do excesso de água com mangueira..... | 68 |
| Figura 49 – Retirada do tubo de PVC | 69 |
| Figura 50 – Uso de papel absorvente para remoção da água em excesso no provete..... | 70 |
| Figura 51 - Provete PROV2 desmoldado..... | 71 |

| | |
|--|----|
| Figura 52 - Ensaio de penetração com agulha no PROV2..... | 72 |
| Figura 53 – Fases de mistura do material com água para o PROV3 | 74 |
| Figura 54 – Etapas da montagem do conjunto do PROV3 | 75 |
| Figura 55 – Remoção do tubo de PVC do PROV3 | 76 |
| Figura 56 – PROV3 desmoldado | 77 |
| Figura 57 - Ensaio de penetração com agulha no PROV3..... | 78 |
| Figura 58 - Remoção do tubo de PVC do PROV4 | 79 |
| Figura 59 – Provete PROV4 dentro do molde bipartido..... | 80 |
| Figura 60 – Provete PROV4 desmoldado..... | 80 |
| Figura 61 – Mistura utilizada para a reconstituição do provete PROV5 | 82 |
| Figura 62 - Remoção do tubo de PVC do PROV5 | 82 |
| Figura 63 - Provete PROV5 dentro do molde bipartido | 83 |
| Figura 64 - Provete PROV5 desmoldado..... | 83 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Comparação operacional entre barragens de rejeitados convencionais e de deposição em pastas e/ou a seco, adaptado de (França & Trampus, 2018)..... | 14 |
| Tabela 2 - Massa seca do provete de solo para ensaio de sedimentação, adaptado de ISO/TS 17892-4:2004 (CEN, 2004b). | 43 |
| Tabela 3 - Dados obtidos com o ensaio de limite de liquidez do RJ1 | 49 |
| Tabela 4 - Resultados obtidos no ensaio de limite de plasticidade do RJ1..... | 50 |
| Tabela 5 - Dados obtidos com o ensaio de densidade de partículas sólidas para o RJ1 . | 54 |
| Tabela 6 - Dados obtidos com o ensaio de densidade de partículas sólidas para o PP1. | 55 |
| Tabela 7 - Dados obtidos com o ensaio de densidade de partículas sólidas para o PP2. | 55 |
| Tabela 8 - Dados do teste para determinação do índice de vazios do PROV1 | 65 |
| Tabela 9 - Quantidades de material, dimensões finais e resultados de ensaios do PROV1 | 66 |
| Tabela 10 - Dados do teste para determinação do índice de vazios do PROV2 | 73 |
| Tabela 11 - Quantidades de material, dimensões finais e resultados de ensaios do PROV2 | 73 |
| Tabela 12 - Dados do teste para determinação do índice de vazios do PROV3 | 78 |
| Tabela 13 - Quantidades de materiais, dimensões finais e resultados de ensaios do PROV3 | 79 |
| Tabela 14 - Dados do teste para determinação do índice de vazios do PROV4 | 81 |
| Tabela 15 - Quantidades de materiais, dimensões finais e resultados de ensaios do PROV4 | 81 |
| Tabela 16 - Dados do teste para determinação do índice de vazios do PROV5 | 84 |
| Tabela 17 - Quantidades de materiais, dimensões finais e resultados de ensaios do PROV5 | 84 |

SIMBOLOGIA

Alfabeto Latino

| | |
|-------------|--|
| CT | Correção de temperatura |
| D | Diâmetro |
| d | Diâmetro equivalente |
| e | Índice de vazios |
| e0 | Índice de vazios inicial |
| <i>emin</i> | Índice de vazios mínimo |
| G | Densidade das partículas sólidas |
| H | Altura |
| Hr | Profundidade efetiva |
| k | Coefficiente de permeabilidade |
| n | Porosidade |
| Pv | Pressão parcial de vapor da água no solo |
| S | Grau de saturação |
| S0 | Área da superfície exterior das partículas por unidade de volume |
| s | Teor de sólidos |
| t | Tempo |
| T | Temperatura |
| V | Volume |
| v | Velocidade |
| w | Teor em água gravimétrico |

Alfabeto Grego

| | |
|-------------|---|
| β | Coefficiente de interação |
| Γ | Índice de vazios crítico quando $\sigma v' = 1$ |
| γ_s | Peso volúmico das partículas sólidas |
| γ_s' | Peso volúmico submerso das partículas sólidas |
| γ_w | Peso volúmico da água |
| Δe | Varição do índice de vazios |

| | |
|------------|--|
| Δh | Assentamento |
| η | Viscosidade |
| θ | Teor em água volumétrico |
| ρ | Densidade |
| ρ_s | Massa volúmica das partículas sólidas |
| ρ_w | Massa volúmica da água |
| Siglas | |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AP | <i>Air pluviation</i> |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| CEN | <i>Comité Européen de Normalisation</i> |
| D90 | Diâmetro equivalente a 90% ou mais da amostra passante |
| EN | Norma Europeia |
| EUA | Estados Unidos da América |
| IC | Índice de consistência |
| IL | Índice de liquidez |
| IP | Índice de plasticidade |
| ISO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| LL | Limite de liquidez |
| LP | Limite de plasticidade |
| LR | Limite de retração |
| MG | Minas Gerais |
| MT | <i>Moist tamping</i> |
| NBR | Norma Técnica Brasileira |
| NP | Norma Portuguesa |
| SD | <i>Slurry deposition</i> |
| TS | <i>Technical Specification</i> |
| WP | <i>Water pluviation</i> |
| WS | <i>Water sedimentation</i> |

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A exploração mineira é uma atividade que explora os recursos minerais do solo ou subsolo e engloba todos os processos, atividades e indústrias ligados à extração de substâncias minerais a partir de depósitos ou massas minerais no solo ou subsolo. A criação de resíduos resultantes da atividade mineira é inevitável e, na maioria das explorações, corresponde a cerca de 90 a 99% do total de material extraído do terreno. Toda essa grande quantidade de material sobrando necessita ser depositada de forma adequada. Durante muitos anos, os rejeitados da atividade mineira eram depositados sem qualquer controle, criando situações catastróficas para o ambiente e para a saúde (Raposo, 2016).

Ensaio com provetes homogêneos (uniformes) sob estados uniformes de tensão e deformação são necessários para estudos de caracterização das propriedades do solo. Também é necessário poder replicar com precisão uma quantidade considerável de provetes homogêneos para tais estudos. Esses requisitos, em conjunto com a dificuldade de se obter amostras indeformadas, têm promovido o uso de solos reconstituídos em

Capítulo 1

detrimento de materiais naturais para investigações do comportamento do solo (Kuerbis & Vaid, 1988).

Técnicas satisfatórias para a obtenção de amostras indeformadas de argila para testes de laboratório têm sido desenvolvidas ao longo dos anos, porém a obtenção de amostras indeformadas de solos não coesivos, e facilmente desagregáveis, ainda é uma tarefa desafiadora. Como resultado, os testes de laboratório desses solos são feitos quase exclusivamente em amostras reconstituídas (Carraro & Prezzi, 2008).

Ensaio de laboratório são muito importantes no avanço da compreensão das características de geomateriais. Amostras indeformadas obtidas do campo são consideradas mais adequadas para estudar o comportamento de solos naturais. No caso de solos não coesivos, o uso de amostras reconstituídas como elementos de solo para realização de ensaios em laboratório ganhou ampla aceitação devido a uma série de razões. Uma delas é a dificuldade em obter amostras de campo não perturbadas de alta qualidade. Assim como a necessidade de ensaiar corpos de prova homogêneos e a necessidade de caracterizar materiais de engenharia feitos pelo homem (Khalili & Wijewickreme, 2008).

Assim, cada corpo de prova de ensaio deve ser preparado individualmente por reconstituição de amostra. Isto viabiliza a uniformidade e a replicação dos corpos de prova, que de outra forma seria muito difícil como o uso de congelamento de solo ou sua impregnação com resina. As técnicas de utilização de corpos de prova reconstituídos têm sido as preferidas para obter propriedades idênticas ou, pelo menos, muito próximas daquelas *in situ*, reproduzindo as mesmas condições *in loco* no estudo do comportamento dos solos não coesivos (Corrêa, 2018).

Neste trabalho, uma nova técnica de preparação é abordada, o método deposição de polpa (“*slurry deposition*”, SD). Este método de preparação da amostra foi selecionado porque é o que melhor representa as condições de campo observadas em barragens de rejeito (Carraro & Prezzi, 2008).

1.2 Objetivos

Com este trabalho pretende-se:

- Efetuar uma revisão bibliográfica das técnicas laboratoriais para a formação de provetes;
- Realizar ensaios de identificação de rejeitados mineiros;
- Aplicar as técnicas de preparação de provetes aos rejeitados mineiros;

1.3 Estrutura da dissertação

O trabalho está dividido em cinco capítulos, de acordo com as etapas de investigação realizadas:

No capítulo 1, introdução, apresenta-se o tema e são definidos os objetivos pretendidos com o trabalho, assim como a justificativa para tal.

No capítulo 2, apresenta-se uma revisão da literatura existente, compreendida por tópicos referentes aos principais assuntos abordados nesta pesquisa, de modo a dar embasamento teórico e científico para o desenvolvimento do trabalho.

No capítulo 3, são descritos os ensaios de caracterização realizados, bem como o método aplicado para a determinação das curvas e parâmetros referentes ao comportamento das amostras utilizando ensaios laboratoriais.

No capítulo 4 é descrito o método desenvolvido para a reconstituição de amostras, descrevendo as tentativas realizadas para chegar no método final.

No quinto e último capítulo, são apresentadas as considerações finais e conclusões obtidas a partir das análises realizadas neste trabalho. Adicionalmente, são apresentadas sugestões para o desenvolvimento de pesquisas futuras.

2. ESTADO DA ARTE

O estado da arte deste estudo foi organizado em 4 itens.

No primeiro item (2.1) exploram-se aspetos ligados ao processamento dos rejeitados. Discute-se a forma como são produzidos, e os equipamentos de espessamento e transporte até ao local de deposição.

No segundo item (2.2) é abordado fenómeno da liquefação, incluindo as situações nas quais a liquefação se desenvolve e as variáveis intervenientes desse processo.

No terceiro item (2.3), descrevem-se os procedimentos para a realização do ensaio triaxial, utilizado para caracterizar a resistência ao cisalhamento de solos.

No último item (2.4), apresentam-se os métodos de reconstituição de amostras mais difundidos em rotinas laboratoriais, dando ênfase para o método de deposição em polpa, o qual foi utilizado como base para o desenvolvimento do método desenvolvido neste trabalho.

2.1. Produção e Espessamento de Rejeitados

Rejeitados mineiros são o subproduto do vasto conjunto de processos que constituem a exploração mineral. Os processos usados visam a obtenção de um concentrado, rico no mineral em exploração, separando-o do material sem valor económico substancial. Na grande maioria dos casos, os processos mineiros são processos húmidos, dos quais resultam lamas contendo os rejeitados. Não apresentando valor económico significativo, os rejeitados têm, pois, que ser depositados de forma segura para o ambiente, naquilo a que habitualmente se chamam instalações de deposição de rejeitados (Raposo, 2016).

Nas últimas décadas a atividade mineira teve um grande crescimento mundial e o avanço tecnológico possibilitou o desenvolvimento de novas técnicas de extração, contribuindo para um aumento da procura de minerais e metais. Este crescimento da atividade mineira levou a um aumento exponencial do volume de rejeitados produzidos. (Costa, 2014). Na Figura 1, apresenta-se um exemplo de mina, a qual está localizada no estado do Arizona, Estados Unidos.



Figura 1 - Mina de Morenci, Arizona, EUA (Wikimedia Commons, 2012).

As propriedades físicas, químicas e mecânicas dos rejeitados estão diretamente relacionadas com os processos físicos e químicos a que são sujeitos, que engloba as

fases de escavação, extração, britagem, moagem, concentração e deposição, como está representado na Figura 2 (Engels, 2006; Vick, 1990).

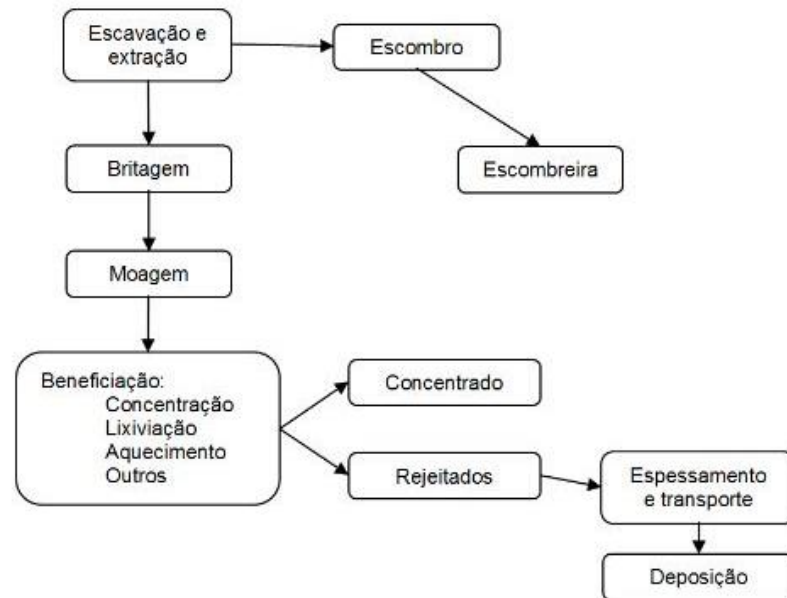


Figura 2 - Processos de exploração de minério bruto (Raposo, 2016).

A fase de escavação é necessária, pois o minério pode estar total ou parcialmente coberto pela rocha encaixante, que é escavada e é designada por escombro e não sofre qualquer tratamento, sendo depositada nas escombreiras. Este escombro pode ser utilizado como material de construção das barragens de rejeitados (Russo, 2007). Após a escavação ocorrem as fases de britagem e moagem da rocha, que permitem a redução das dimensões da rocha até o tamanho desejado. A britagem acontece em várias fases, com o uso de equipamentos funcionando em série, e realizada no interior da mina, facilitando o transporte do material para a superfície. Já a moagem tem como objetivo reduzir ainda mais os fragmentos produzidos pelos equipamentos de britagem (Costa, 2014; Raposo, 2016; Vick, 1990).

O método de extração mais vantajoso para cada tipo de material é definido a partir de um exame mineralógico simples, em que é possível identificar outros minerais de interesse económico, assim como o tipo e a quantidade de reagentes necessários para separar o concentrado (Engels, 2006; Ritcey, 1989).

A concentração consiste em separar o minério das partículas sem valor, chamadas de rejeitados. Para tanto, são usados diversos processos, entre os quais se destacam a separação gravítica, separação magnética e a flotação. A flotação é o método de concentração mais utilizado, sendo a primeira fase realizada, na sequência

do processamento mineral, em que os reagentes químicos são introduzidos (Vick, 1990). Após ou durante a fase de concentração pode ocorrer a lixiviação e o aquecimento. A lixiviação consiste na utilização de reagentes, geralmente uma solução forte, ácida ou alcalina, que dissolvem os minerais e os transformam em sais solúveis (Krizek, 2004).

2.1.1 Rejeitado sob a forma de Polpa

Os rejeitados, após sua beneficição, apresentam um aspeto e uma consistência idêntica a de uma lama, chamada de polpa e pode ser descrita como uma mistura sólido-líquido. Na Figura 3 está representada a deposição de rejeitado de níquel sob a forma de polpa, em Minas Gerais, Brasil, sendo possível analisar a consistência líquida do rejeitado. Devido ao seu baixo teor de sólidos, a polpa pode sofrer segregação e, quando sua deposição ocorre em barragens convencionais apresenta riscos físicos ao meio ambiente, podendo ocasionar perdas econômicas, sociais e ambientais significativas no entorno, no caso de eventuais rompimentos de barragens (França & Trampus, 2018).



Figura 3 - Deposição de rejeitado sob a forma de polpa em barragem convencional (França & Trampus, 2018).

Esta polpa contém uma grande quantidade de água misturada aos sólidos e é de interesse da indústria mineira recuperar parte desta água. Para tal, os rejeitados são sujeitos a processos de espessamento, aumentando a concentração de sólidos, tornando a polpa mais densa e viscosa. O interesse em remover a água em excesso tem duas

motivações: reaproveitar a água contida nos rejeitados e/ou auxiliar a sua deposição. A primeira é importante em regiões onde há a escassez de água e a segunda onde é necessário minimizar a área afetada pela deposição (Raposo, 2016).

2.1.2 Rejeitado Espessado

O espessamento é um processo de sedimentação por gravidade que resulta num grande aumento da concentração da suspensão com a consequente formação de um líquido límpido (Pinasseau et al., 2018).

Um dos fatores que justificam o desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias para a deposição de rejeitados da mineração é a escassez de água de qualidade, devido a fatores climáticos e questões ambientais, bem como a competição pelo seu uso entre comunidades e outras atividades, como agricultura. Quando a utilização dos espessadores ocorre próximo à usina de beneficiamento o custo se torna mais baixo e é possível recuperar e recircular parte da água de processos e reagentes (Falcucci & Peres, 2010; Soares, 2010).

Ter menor quantidade de água misturada ao rejeitado trás alguns benefícios, primeiro em termos da estabilidade da barragem, principalmente pela ausência de água junto à barragem, segundo pela redução da probabilidade de contaminação pela percolação de água pela fundação ou corpo da barragem (Araujo, 2006).

A deposição convencional de rejeitados (sob a forma de polpa) se diferencia da deposição do rejeitado espessado principalmente na forma em que a deposição ocorre. No primeiro, a polpa de rejeitado é bombeada em regime turbulento para a barragem, onde ocorre a segregação e sedimentação das partículas, formando uma superfície plana. No caso da deposição da pasta, a polpa é previamente adensada, até atingir uma consistência homogênea, levando a um fluxo laminar sem segregação granulométrica das partículas (Falcucci & Peres, 2010).

O espessamento dos rejeitados pode ser realizado por meio de espessadores ou hidrociclones. No entanto, os espessadores são os mecanismos mais utilizados, pois apresentam menores custos operacionais e recuperam diretamente a água de circulação. Na Figura 4, apresenta-se um espessador em cone profundo. O produto que resulta deste processo são os rejeitados espessados ou em pasta, que possuem uma menor quantidade de água juntamente ao material, apresentando um aspeto mais sólido (Costa, 2014). A adição de floculantes tem melhorado os processos de espessamento ao longo

dos anos, unindo as partículas em grupos de múltiplas partículas ou flocos (Salfate, 2011).



Figura 4 - Espessador de cone profundo (Oliveira, 2011)

Na Figura 5 apresenta-se o esquema de um espessador, formado por tanques dotados de braços rotatórios que conduzem os sólidos em decantação do rejeitado para a região central do tanque, onde são coletados e bombeados para o sistema de contenção da unidade. A polpa espessada é conduzida por gravidade, através de calhas ou tubulações, para a barragem de rejeitados. A água recuperada é, geralmente, recirculada para o processo de beneficiamento (Araujo, 2006).

1. Tanque cilíndrico-cônico
 $D \gg H$
2. Poço de alimentação central, na zona de clarificação
3. *Overflow*
Água clarificada
4. *Underflow*
Lodo espessado
5. Raspadores de lodo (rastelos)

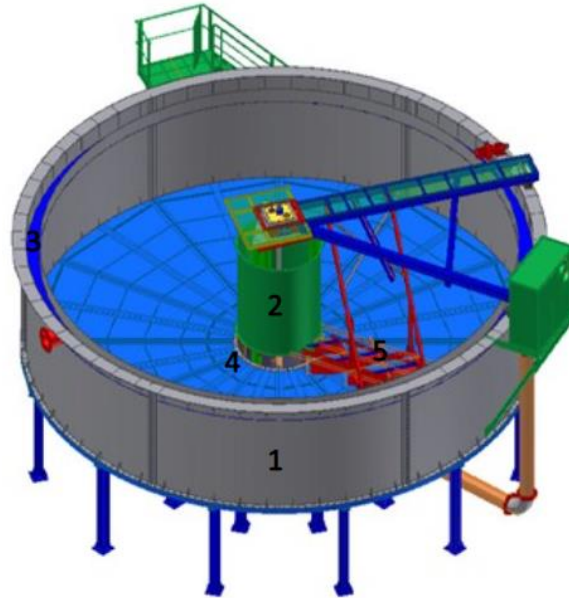


Figura 5 – Elementos principais de um espessador (Souza, 2013)

O hidrociclone separa as partículas do material por tamanho (classificação granulométrica dos rejeitados). A polpa é injetada sob pressão, com percentagem de sólidos pré-estabelecida. O material segue uma trajetória helicoidal, em que as partículas mais grossas são direcionadas para as paredes do ciclone devido à força centrípeta e os finos se acumulam no centro do equipamento. O material que sai por baixo do equipamento tem granulometria mais grossa e é chamado de *underflow*, apresentando pouca quantidade de água. Os finos transbordam do equipamento, misturados em água, e são chamados de *overflow*. Na Figura 6 é possível ver o esquema de um hidrociclone.

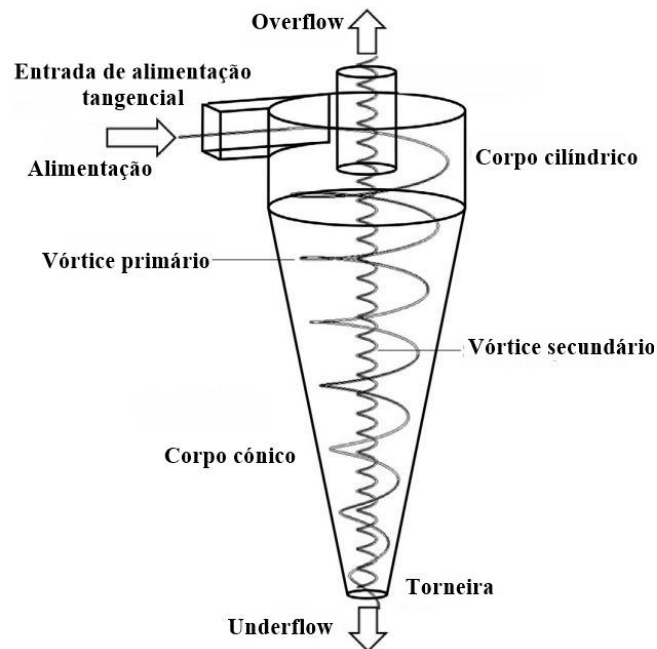


Figura 6 - Esquema de um hidrociclone mostrando suas principais partes e fluxos, adaptado de Vega-Garcia et al. (2018).

A deposição de rejeitados em forma de pastas apresenta várias vantagens em relação à deposição da polpa de rejeitados (Tessarotto, 2015):

- i) necessita menores áreas para deposição, pois o material contém menor quantidade de água;
- ii) as pastas são depositadas em forma de cone, o que permite o escoamento da água das chuvas sobre o mesmo e apenas um pequeno percentual de infiltração;
- iii) reutilização da água no processo de mineração;
- iv) maximiza a densidade dos rejeitados, facilitando seu armazenamento;
- v) minimiza a área necessária para estoque da lama;
- vi) torna o resíduo adequado para o preenchimento (*backfill*) de minas;
- vii) reduz a necessidade de drenagem;
- viii) menor probabilidade de contaminação das águas subterrâneas;
- ix) redução do risco de falhas nas barragens.

Na Figura 7 é possível analisar as diferenças na deposição entre polpa de alta densidade e pasta mineral, em diferentes métodos de deposição.

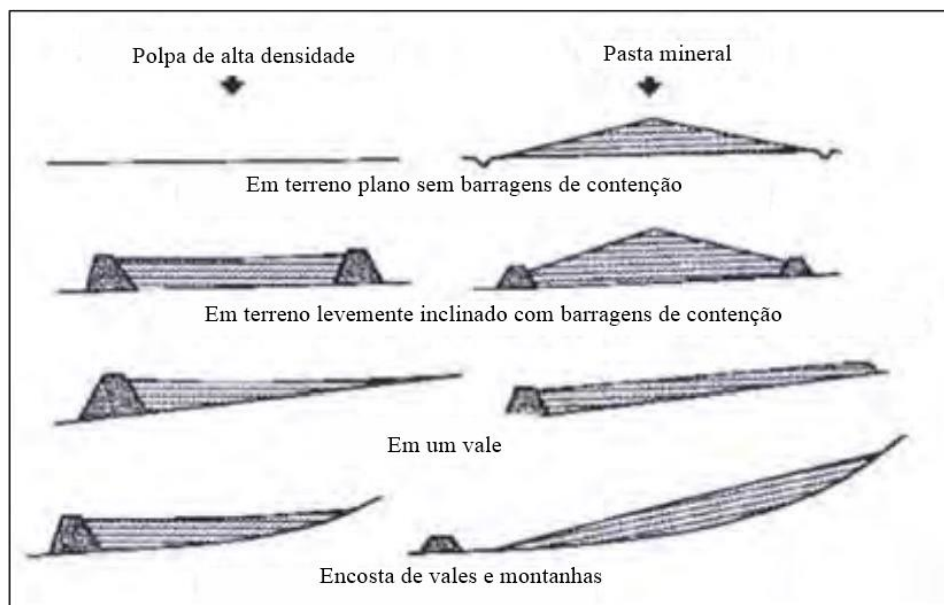


Figura 7 - Comparação entre os métodos de deposição convencional e em pastas, adaptado de Tessarotto (2015).

Na Tabela 1 a seguir são apresentadas características sobre a deposição de rejeitados em barragens convencionais (polpa) e a deposição de rejeitados espessados (em pasta) ou filtrados.

Tabela 1 - Comparação operacional entre barragens de rejeitados convencionais e de deposição em pastas e/ou a seco, adaptado de (França & Trampus, 2018)

| Características/Tipo de deposição | Barragens convencionais | Deposição em pasta ou filtrado |
|--|---|--|
| Volume de rejeitado | grande, com 25-30% de sólidos | 1/6 do convencional, com >60% de sólidos |
| Presença de água | mais de 50% | cerca de 10-30% |
| Deposição de água | requer dique de contenção de água | requer apenas área de empilhamento |
| Recuperação de água | pequena; perdas por evaporação e infiltração (indesejada) | elevada; água recuperada na planta, antes da deposição |
| Contaminação de aquíferos | possível | baixa ou nula |
| Densidade final do rejeitado | baixa | alta |
| Riscos de liquefação na barragem | possível a alta | baixo ou mínimo |
| Risco de falha da barragem | alto | baixo ou mínimo |
| Uso da terra após o fechamento da mina | difícil recuperação da área | passível de recuperação e reuso |

Todos os processos a que o rejeitado é submetido vão afetar suas características e comportamento, portanto o material que se apresenta sob a forma de lama, espessado ou em pasta vai ter suas próprias características finais. As propriedades destes dependem, em geral, do tipo de mineral que se pretende extrair, do seu processamento, dos reagentes utilizados e do tipo de espessamento empregado. Mesmo em minas com processos de extração semelhantes as propriedades dos rejeitados ainda podem variar (Engels, 2006; Ritcey, 1989).

2.2. Liquefação

O termo liquefação está associado a uma variedade de fenômenos envolvendo deformações causadas por carregamentos monotônicos, transientes ou cíclicos em solos não coesivos e saturados (Kubo & Mogami, 1953). Quando solos granulares não coesivos saturados são solicitados rapidamente, o carregamento ocorre em condições não drenadas, ou seja, a tendência de contração dos solos não coesivos leva ao aumento da

pressão neutra, diminuindo a tensão efetiva do solo (Abreu, 2012). Exemplos destes carregamentos muito rápidos podem ser a construção de aterros e obras de taludes muito inclinados ou estruturas geotécnicas sujeitas a elevação freática repentina. (Corrêa, 2018).

A ocorrência da liquefação estática em barragens de rejeitados tem sido muito investigada ao redor do mundo devido às suas potenciais consequências destrutivas, muitas vezes envolvendo perdas de vidas humanas além de danos económicos, sociais e ao meio ambiente (Rafael & Romanel, 2014).

Este fenómeno pode estar relacionado com vários fatores, em especial com a constituição do material. Características como a complexidade e a não-linearidade do material, bem como as mudanças das características do solo ao longo do tempo, que afetam o seu comportamento, estão ligadas à liquefação (Ramos, 2013). Os solos suscetíveis à ocorrência deste fenómeno são os que apresentam tendência de contração de volume sob corte, como as areias fofas. Os rejeitados mineiros são, em geral, materiais granulares e/ou finos não plásticos que, quando dispostos hidraulicamente, tendem a formar camadas de material de baixa compacidade, com alto grau de saturação, suscetíveis à liquefação pela aplicação de carregamentos não-drenados (Rafael & Romanel, 2014).

A ação de um sismo corresponde a um carregamento de corte cíclico aplicado a todo o maciço de forma muitíssimo rápida. Cada ciclo vai, pois, acarretar pressões hidrostáticas excessivas nos poros do solo. Como os ciclos se sucedem muito rapidamente, e como os excessos de pressão nos poros abrangem praticamente todo o depósito arenoso, não há possibilidade de significativa dissipação daquelas sobrepensões durante o evento. Desta forma, se o sismo for suficientemente intenso e longo, os excessos de pressão neutra acumulados podem fazer com que o valor da pressão neutra iguale o valor da tensão total. Nestas circunstâncias, anulam-se as tensões efetivas, desencadeando-se a liquefação, já que, sendo nulas aquelas tensões, se anula a resistência ao corte do solo (Matos Fernandes, 2011).

A liquefação tem efeitos catastróficos nas estruturas apoiadas sobre o maciço em que ocorre, embora a duração seja muito curta, já que, após a ocorrência do sismo, a dissipação das sobrepensões se processa rapidamente, tendendo as partículas se rearrajarem com uma compacidade maior do que a anterior ao sismo, o que conduz a

um assentamento da superfície do terreno, como ilustrado na Figura 8 (Matos Fernandes, 2011).

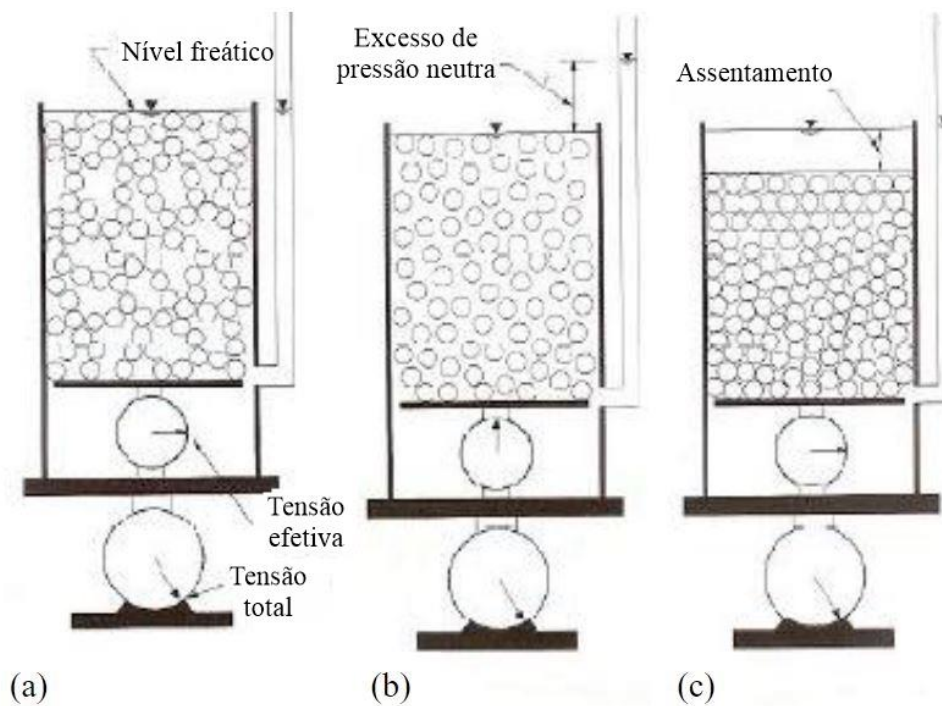


Figura 8 - O fenômeno da liquefação: a) antes da liquefação; b) durante a liquefação; c) após a liquefação (Matos Fernandes, 2011).

Na Figura 9 estão apresentadas as etapas sequenciais do que poderia ser o processo de desencadeamento da liquefação. A resistência ao corte de solos granulares está ligada ao atrito entre as partículas, pela figura verifica-se que a perda crescente de mobilização de atrito entre as partículas durante o fenômeno é a causa primária da perda da resistência ao corte dos elementos de solo de natureza granular (Pereira, 2005).

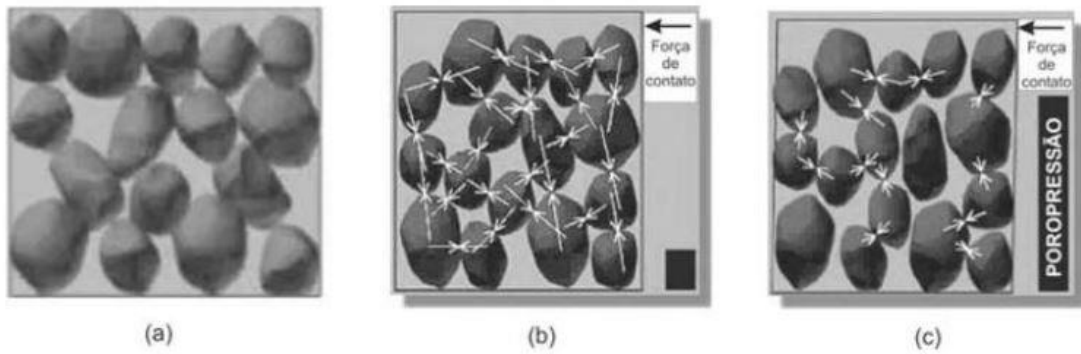


Figura 9 - Etapas da liquefação (Pereira, 2005).

Na Figura 9a o solo granular está no estado fofa e saturado e sofre um carregamento rápido, o que causa uma mudança brusca da sua estrutura, tendendo a um arranjo mais compacto entre as partículas. Na figura seguinte (Figura 9b) é ilustrada a água intersticial sendo confinada por elevadas pressões (pressão neutra), pois não houve tempo suficiente para ocorrer a sua drenagem. Estas pressões não permitem a aproximação das partículas sólidas e diminui o atrito entre as partículas e a resistência do solo. Na última figura (Figura 9c) a pressão neutra aumenta e o contato entre as partículas diminui mais ainda, reduzindo substancialmente a resistência do solo, que passa a se comportar como um fluido viscoso, resultando na sua liquefação.

Os rejeitados granulares são depositados hidraulicamente em barragens de rejeitado, apresentando-se saturados e com baixa densidade relativa, portanto, a análise do potencial de liquefação do solo é importante. O mecanismo que provoca a liquefação estática dos materiais tem a possibilidade de ocorrer quando os rejeitados encontram-se nestas condições e existe a ocorrência de um carregamento não drenado sobre eles. Algumas das formas deste mecanismo ocorrer pode ser devido à velocidade de construção, mudanças na pressão neutra geradas por chuvas intensas e o alto nível do reservatório, bem como por galgamentos dos resíduos sobre a crista da barragem (Rafael & Romanel, 2014).

A velocidade dos alteamentos no método de construção a montante deve ser cuidadosamente controlada para prevenir um acréscimo significativo das pressões neutras. Algumas recomendações de ordem prática, com base em análises pós-rutura por liquefação estática de várias barragens de rejeitado, que podem ser seguidas são de que deve-se garantir que a densidade relativa dos rejeitados dos diques seja maior do que a densidade relativa crítica, assim como deve-se contar com um sistema de

drenagem eficiente de modo a impedir que os rejeitados dentro da estrutura de retenção permaneçam na condição saturada (Smith, 1972).

2.3. Ensaio Triaxial

O ensaio de laboratório mais utilizado para caracterizar a resistência ao corte dos solos é o ensaio triaxial. Os ensaios triaxiais foram concebidos de forma a permitir um controlo completo dos estados de tensão total e efetiva, da pressão neutra e do estado de deformação das amostras (Matos Fernandes, 2011). O objetivo deste ensaio é a caracterização mecânica dos solos através da resistência ao corte e da relação tensão-deformação, em condições drenadas e não drenadas.

Na Figura 10 é representado o esquema de uma câmara triaxial convencional, em que a amostra cilíndrica é colocada num pedestal, fazendo com que o seu eixo e o da câmara coincidam. A amostra é protegida por uma membrana impermeável e duas pedras porosas são colocadas nas bases da amostra (Matos Fernandes, 2011).

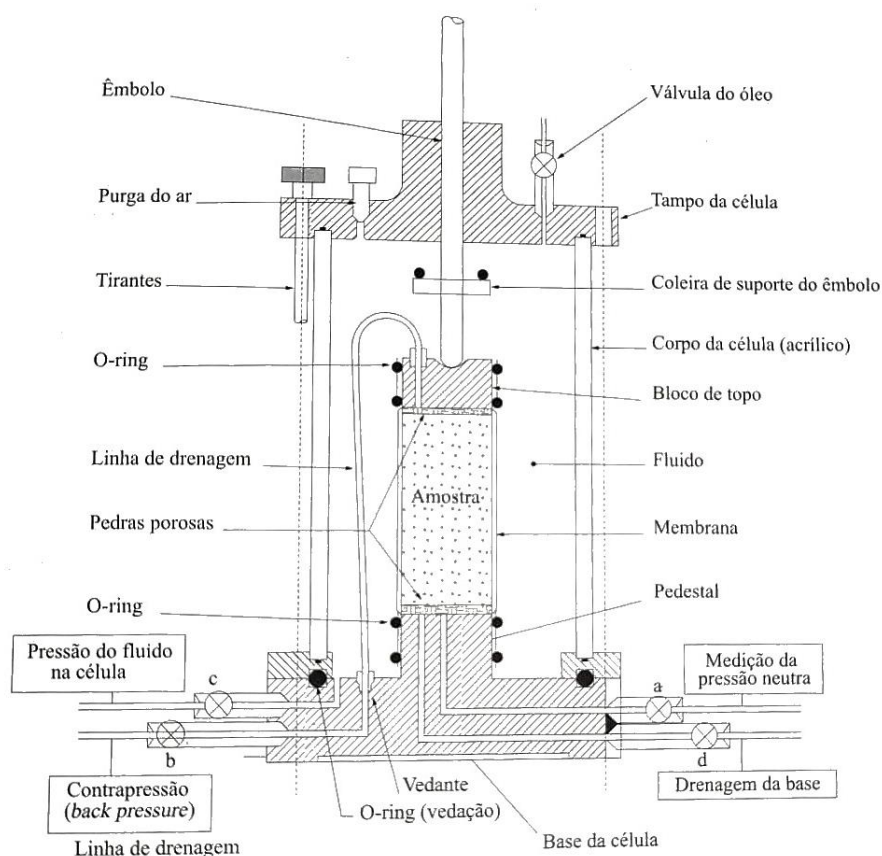


Figura 10 - Pormenor da célula triaxial (Matos Fernandes, 2011).

A câmara da célula triaxial tem água em seu interior, cuja pressão pode ser estabelecida através de uma ligação a um compressor (ligação c na Figura 10). Por sua vez, o topo da amostra é carregado por meio de um êmbolo ligado a uma prensa, sendo medida a força por ele aplicada por meio de um anel dinamométrico ou por um transdutor de força.

A pressão neutra da amostra pode ser medida por meio de um transdutor de pressão colocado numa das ligações ao exterior. Além disso, um dado valor da pressão na água dos poros pode ser imposto através da ligação a um compressor.

As deformações da amostra são medidas durante o carregamento triaxial. A forma convencional de proceder consiste em medir as deformações axiais do provete por meio de um deflectómetro ligado ao êmbolo.

Os provetes utilizados neste ensaio podem variar de tamanho, sendo os mais comuns os diâmetros de 38 mm, 52 mm, 70 mm e 100 mm, com a sua altura devendo ser o dobro do diâmetro (ASTM, 2017, 2020)

Os ensaios de caracterização mecânica de solos em laboratório têm como objetivo simular de forma tão aproximada quanto possível as condições prevalecentes nos maciços terrosos antes do carregamento e aquelas que serão impostas pelas estruturas com que interatuarão.

No que diz respeito à reprodução das condições *in situ* antes do carregamento, os ensaios devem ser realizados com amostras indeformadas. Por outro lado, sendo o comportamento do solo, como discutido, comandado pelas tensões efetivas, compreender-se-á a conveniências de os ensaios de corte serem precedidos pela reconstituição nas amostras do estado de tensão efetiva de repouso ou de um estado próximo daquele. Tal é condição básica para que a resposta no ensaio se aproxime da resposta do solo no campo. Esse processo é designado por consolidação das amostras e assume particular importância para as argilas.

Outro aspeto a relevar é a necessidade de reprodução das condições de drenagem do problema a estudar. Com efeito, quando se aplica determinada sollicitação sobre um solo fino se desenvolve na água dos poros uma sobrepressão ou excesso de pressão neutra. O desenvolvimento deste excesso de pressão neutra vai dar origem a um processo de consolidação por meio do qual ele se dissipa, retomando a água dos poros as condições de equilíbrio. Se o tempo necessário para a consolidação for muito maior

do que o correspondente à fase de aplicação da solicitação, é possível abordar o problema, simplificadamente, em duas fases:

- a) Uma primeira fase de carregamento sob condições não drenadas, durante a qual se desenvolve no maciço o excesso de pressão neutra, mas sem variação do teor em água do solo;
- b) Uma segunda fase de dissipação do excesso de pressão neutra (consolidação).

Para simular o carregamento em condições não drenadas são realizados ensaios nos quais o solo é carregado mantendo fechadas todas as ligações da água dos poros ao exterior, garantindo-se assim que não há variação do teor em água da amostra durante o corte. Estes ensaios são designados por ensaios não drenados.

Noutras situações interessa caracterizar o comportamento e a resistência do solo carregado de tal forma que nele não sejam gerados excessos de pressão neutra ou, tendo estes sido gerados, caracterizar o comportamento do maciço após o processo de consolidação. Têm então lugar ensaios em que durante o carregamento se permite a drenagem da amostra e se garante que esta é carregada sem geração de excessos de pressão neutra. Estes ensaios são designados por ensaios drenados.

Existe uma modalidade de ensaios triaxiais, os ensaios triaxiais dinâmicos, por meio dos quais se pode avaliar o potencial de liquefação de uma amostra de areia saturada. Esses ensaios são conduzidos impondo tensões de corte cíclicas (com determinadas frequência e amplitude) à amostra sem permitir a drenagem da mesma. A rotura da amostra ocorre precisamente quando se anula a tensão efetiva no seu interior. As amostras para esses estudos podem ser obtidas com a técnica da congelação ou fabricadas em laboratório.

2.4. Métodos de Reconstituição de Provetes para o Ensaio Triaxial

Estudos laboratoriais controlados são de extrema importância para a obtenção de conhecimento sobre solos que existem na natureza ou são resultados de obras humanas. Ensaios de laboratório específicos avaliam as propriedades do elemento de solo e seu comportamento. Isto requer trabalhar com provetes homogêneos (uniformes) e que possam ser facilmente replicáveis (Corrêa, 2018).

Técnicas satisfatórias para a obtenção de amostras indeformadas de argila para testes de laboratório têm sido desenvolvidas ao longo dos anos, porém a obtenção de amostras indeformadas de solos não coesivos, e facilmente desagregáveis, ainda é uma tarefa desafiadora. Como resultado, os testes de laboratório desses solos são feitos quase exclusivamente em amostras reconstituídas (Carraro & Prezzi, 2008).

Ensaaios com provetes homogêneos (uniformes) sob estados uniformes de tensão e deformação são necessários para estudos de caracterização das propriedades do solo. Também é necessário poder replicar com precisão uma quantidade considerável de provetes homogêneos para tais estudos. Esses requisitos, em conjunto com a dificuldade de se obter amostras indeformadas, têm promovido o uso de solos reconstituídos em detrimento de materiais naturais para investigações do comportamento do solo (Kuerbis & Vaid, 1988).

Um método de reconstituição de provetes deve atender a alguns critérios, sendo eles: 1) o método deve ser capaz de produzir provetes na faixa de densidade esperada de acordo com o depósito de solo *in situ*; 2) as amostras devem apresentar índice de vazios uniforme em toda a extensão; 3) as amostras devem estar totalmente saturadas, principalmente para ensaios não drenados; 4) as amostras devem ser bem misturadas sem segregação granulométrica, independentemente da sua granulometria ou teor de finos; e 5) o método de preparo do provete deve simular o modo de deposição do solo comumente encontrado no depósito de solo que está sendo modelado (Kuerbis & Vaid, 1988).

Diversos métodos de reconstituição de provetes foram desenvolvidos ao longo do tempo, influenciados pela região em que a investigação está sendo elaborada, do tipo de solo estudado, e das características que são de interesse dos investigadores. Os métodos apresentam algumas características em comum, principalmente a busca por provetes uniformes e com a sua densidade controlada, porém estes requisitos deixam de lado outras características importantes na avaliação da qualidade dos provetes, sendo uma delas o arranjo das partículas presentes dentro do provete, que pode ou não representar o arranjo encontrado *in situ*. Esta é uma das maiores dificuldades no desenvolvimento de um método de reconstituição satisfatório, elaborar provetes com o arranjo das partículas, conhecida na bibliografia anglo-saxônica por *fabric*, semelhante à encontrada *in situ*. Os métodos mais utilizados atualmente geram um arranjo de partículas próprio, que tende a ser muito diferente do solo estudado (Corrêa, 2018).

Na literatura é possível encontrar diversas investigações que tem como foco o estudo do comportamento de argilas puras, material coesivo, ou areias limpas, material não coesivo, porém grande parte destes estudos não contempla os solos de transição (siltosos), em parte porque o estudo deste tipo de solo se mostra mais difícil do que os anteriores. Entretanto o interesse por este tipo de material tem crescido, trazendo com ele a necessidade de se reavaliar os métodos de reconstituição de provetes, desenvolvendo métodos que melhor representem estes solos.

A resposta mecânica de provetes de solo arenoso reconstituídos em laboratório depende do método utilizado para prepará-los. No caso de areias contendo finos, o efeito é ainda mais pronunciado, pois questões adicionais (segregação de partículas, homogeneidade do provete e adequação do arranjo das partículas dos provetes reconstituídos) surgem devido à presença da fração mais fina dentro da estrutura do solo (Carraro & Prezzi, 2008).

As técnicas de reconstituição mais utilizadas para areias contendo finos são a compactação com pilão (*moist tamping*, MT), pluviação no ar (*air pluviation*, AP) e pluviação em água, também conhecido como sedimentação em água (*water pluviation* WP ou *water/wet sedimentation*, WS), e suas variantes, tais como técnicas de deposição de polpa (*slurry deposition*, SD). Esses métodos atuais foram desenvolvidos com o objetivo de simular o arranjo das partículas num elemento de solo e as condições de saturação encontradas em massas de solo naturalmente depositadas ou construídas pelo homem (Khalili & Wijewickreme, 2008).

2.4.1 Método de Compactação com Pilão (MT)

A técnica mais antiga para reconstituição de provetes é a compactação com pilão, conhecida na bibliografia anglo-saxónica por *moist tamping* (MT). Neste método camadas de material húmido (a quantidade de água deve ser uniforme e controlada) de espessura pré-determinada são colocadas no molde e compactadas com a força e frequência especificada, para em seguida uma nova camada ser adicionada, como representado na Figura 11. A densidade relativa desejada é controlada pelo esforço de compactação e a quantidade de material das camadas. O teor de humidade inicial varia de 5% para areias até 20% para solos mais finos (Sze & Yang, 2014).

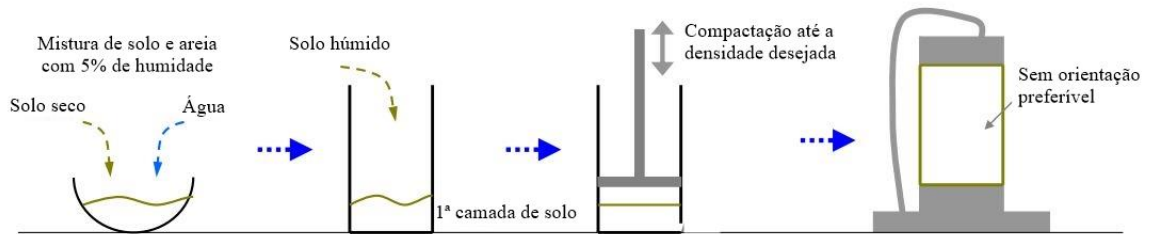


Figura 11 - Ilustração esquemática do método MT, adaptado de Sze & Yang (2014).

Provetes de areia preparadas pelo método de compactação húmida podem ser obtidos com taxas de vazios muito maiores do que o possível em um estado seco ou saturado devido às forças de tensão da água entre os grãos (Kuerbis & Vaid, 1988). Daqui resultam provetes particularmente propensos à liquefação devido a sua estrutura em favo de mel, devido às forças capilares entre os grãos húmidos, os quais podem sofrer grandes deformações durante o processo de saturação (abatimento do provete) devido à remoção das forças de tensão da água entre os grãos (Casagrande, 1975).

2.4.2 Método de Pluviação ao Ar (AP)

No método de pluviação ao ar, designada na literatura anglo-saxónica por *air pluviation* (AP), o material seco é lançado ou “pluviado” a partir de uma determinada altura. Nesse método as partículas são vertidas no molde da amostra ao ar a partir de uma altura de queda que é tipicamente mantida constante durante a deposição, como representado na Figura 12.

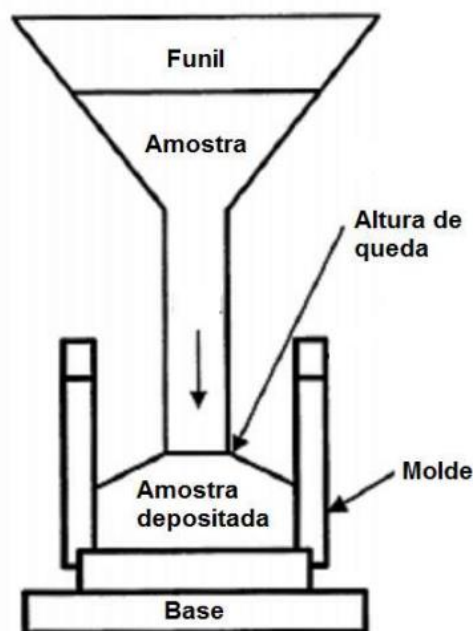


Figura 12 – Ilustração esquemática do método AP, adaptado de Wood (2008).

A altura de queda usada nesta técnica pode ser ajustada para produzir diferentes densidades relativas (Carraro & Prezzi, 2008; Kuerbis & Vaid, 1988). Os principais fatores que afetam a densidade relativa das areias pluviadas ao ar são a altura de queda de partículas (Vaid & Negussey, 1988) e a taxa de deposição (Miura & Toki, 1982). Uma altura de queda mais alta resulta em uma energia de deposição mais alta e, portanto, uma amostra de solo mais densa (Kuerbis & Vaid, 1988).

Pode ocorrer a segregação de areias bem graduadas quando depositadas por pluviação ao ar, especialmente se houver uma considerável quantidade de finos. O processo de saturação do provete pode perturbar a estrutura inicial da areia e gerar segregação devido à remoção dos finos. A pluviação ao ar geralmente não simula o processo de deposição nem a variação de índice de vazios possíveis em enchimentos hidráulicos (Kuerbis & Vaid, 1988).

2.4.3 Método de Deposição em Água (WP)

O método de deposição em água, ou *water deposition* (WP) segue a ideia aproximada da sedimentação natural em água. Este método consiste em derramar areia seca ou saturada em um molde de provetes preenchido com água. Para cada uma das camadas a ser formada, água desaerada é cuidadosamente vertida dentro de um molde, e então é usado um funil por onde o material saturado é cuidadosamente depositado dentro da água. O processo de deposição ocorre sob gravidade e completamente

submerso (Corrêa, 2018). Na Figura 13 é apresentada uma ilustração esquemática do processo de deposição em água.

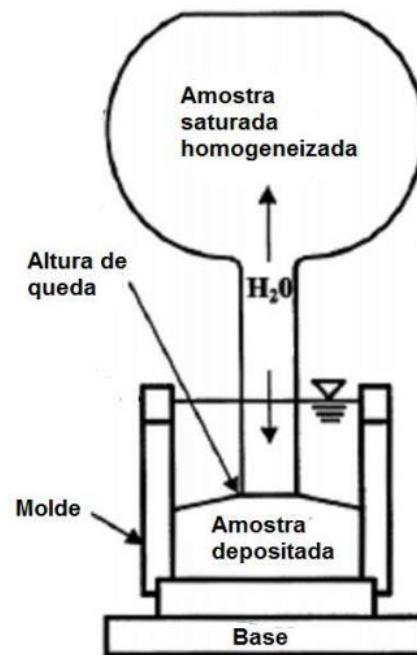


Figura 13 - Ilustração esquemática do método WP, adaptado de Wood (2008).

A altura de queda nesta técnica não tem efeito significativo sobre a densidade depositada da amostra, porque as partículas de areia geralmente atingem a velocidade terminal de queda a uma distância relativamente curta, fazendo com que a velocidade no momento da deposição seja quase a mesma para todas as partículas. Por exemplo, partículas de areia com um diâmetro médio de 0,4 mm mostraram atingir a velocidade terminal dentro de apenas 2 mm de deslocamento (Vaid & Negussey, 1988).

Como resultado, verificou-se que provetes de areia preparados usando esta técnica são relativamente uniformes e em um estado geralmente fofo. Se necessário, amostras mais densas podem ser obtidas compactando-se com um soquete ou vibrando o molde da amostra após ou durante a precipitação de água. Segundo Ladd (1978), vários problemas estão associados ao método de WP. Os dois mais significantes são (1) a segregação de partículas ao usar areias limpas e relativamente bem graduadas e (2) a dificuldade de preparar amostras de ensaio observando uma densidade seca prescrita.

Foram realizadas comparações diretas entre o comportamento de provetes limpos não-perturbados e de areia siltosa (Vaid et al., 1999) recuperados por congelamento de solo *in situ* e seus correspondentes reconstituídos após consolidação em estados iniciais idênticos. Os resultados mostraram que o tecido gerado pelo WP

simula de perto o da areia natural aluvial e de enchimento hidráulico. Em resumo, uma revisão crítica da literatura sugere que os métodos de deposição de água simulam melhor o arranjo das partículas e a resposta tensão-deformação da maioria dos depósitos de solos de areias com ou sem finos (Carraro & Prezzi, 2008).

2.4.4 Método de Deposição em Polpa (Slurry Deposition, SD)

Para superar alguns dos problemas inerentes relacionados aos métodos de reconstituição mencionados, especialmente o problema de segregação das partículas, o método de deposição em polpa foi desenvolvido (Kuerbis & Vaid, 1988). Ele surgiu como uma alternativa ao método de deposição em água (WP), e é capaz de recriar o mesmo arranjo das partículas e resposta tensão-deformação que o método WP (Carraro & Prezzi, 2008). A primeira versão do método SD encontrada na literatura para areia siltosa não apresentou provetes muito homogêneos para quantidades de finos entre 30 % e 80 % (Ishihara et al., 1978), porém outra versão desenvolvida foi capaz de produzir provetes homogêneos de areias bem graduadas e areias siltosas (Kuerbis & Vaid, 1988).

O método de deposição em polpa utilizado por Kuerbis & Vaid (1988) para produzir provetes de areias mal graduadas ou siltosas é descrito a seguir e está representado na Figura 14.

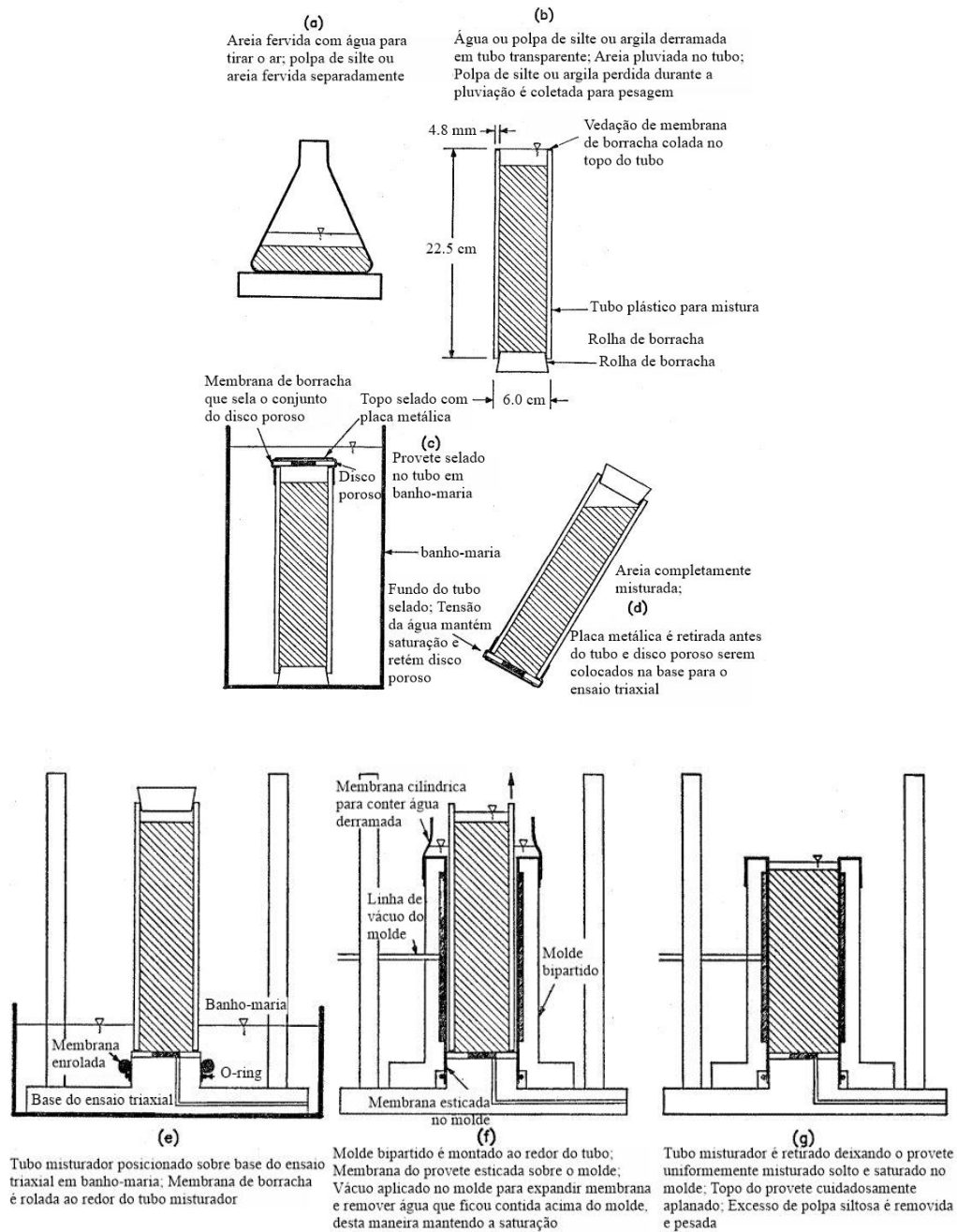


Figura 14 - Método para preparação de provetes, adaptado de Kuerbis & Vaid (1988).

(a) Uma massa de areia suficiente para encher o molde de preparação de amostra com densidade mínima é despejada em um frasco com água suficiente e fervida por quinze minutos para remover o ar da mistura. Após o resfriamento, mais água desareada é adicionada ao frasco para preenchê-lo completamente. Se a amostra contém silte ou argila, um frasco separado é preenchido com os finos e um volume de água de aproximadamente 60% do volume final da amostra. A pasta de finos também é fervida para remover o ar e resfriada.

(b) O tubo misturador é um tubo cilíndrico de acrílico transparente com 22,5 cm de comprimento, 6 cm de diâmetro e com paredes de 5 mm de espessura. O tubo tem uma membrana de borracha para vedação em uma extremidade e uma rolha de borracha para vedar a outra extremidade. A pasta de finos é despejada no tubo misturador e completada com água sem ar. A pasta é deixada assentar no fundo do tubo antes que a fração de areia da amostra de solo seja pluvizada no tubo. Alguns finos que podem ficar para fora do tubo após a pluviação são retidos e pesados quando secos.

(c) Uma fina membrana de borracha de 5 cm de diâmetro é enrolada na parte externa da extremidade aberta do tubo e o tubo é colocado em banho-maria. Um disco poroso fervido e desaerado, que forma a placa inferior do aparelho de teste triaxial sobre o qual a amostra acabada será assentada, é colocado na extremidade aberta do tubo de mistura dentro do banho-maria, mantendo a saturação do disco poroso. A membrana de borracha ao redor da extremidade do tubo de mistura é puxada sobre o conjunto do disco poroso. Uma fina placa metálica redonda, com aproximadamente o mesmo diâmetro que o disco poroso, é colocada sobre o conjunto de disco poroso e membrana de borracha que o veda.

(d) O tubo de mistura é então retirado do banho-maria. A pasta dentro do tubo da amostra é então misturada girando vigorosamente o tubo. O progresso da mistura da amostra pode ser observado através do tubo de plástico transparente. Vinte minutos de mistura foram suficientes para obter amostras completamente homogêneas.

(e) A base da célula triaxial está em banho-maria e uma membrana de borracha é enrolada nela e presa com um o-ring. O tubo de mistura é deixado na posição vertical com a extremidade da placa metálica para baixo até que a mistura assente e se torne estável. Então a placa metálica é retirada e o disco poroso se mantém preso ao tubo pela tensão da água e pela membrana. O tubo é encaixado sobre a base do ensaio triaxial, a membrana segurando a pedra porosa é removida e a membrana que está na base do ensaio triaxial é rolada para cima ao redor do tubo.

(f) Um molde bipartido é posicionado ao redor do tubo e a membrana cobrindo a amostra é puxada para fora cobrindo o topo do molde. Outra membrana, de diâmetro maior, é colocada ao redor do molde com sobras para cima, neste local é preenchido com água, para formar um banho-maria. Vácuo é aplicado no molde para que a membrana interna grude ao molde e tenha o formato adequado para receber a amostra.

A rolha de borracha que tapa a extremidade do tubo de mistura da amostra é removida. O excesso de finos de pasta ou água são retirados do topo do tubo de mistura e são pesados quando secos para determinar o conteúdo exato de finos da amostra de areia.

(g) O tubo de mistura da amostra é então cuidadosamente retirado para depositar a pasta de areia dentro da membrana da amostra em um estado saturado muito solto e homogêneo. O topo da amostra é cuidadosamente nivelado, o excesso de pasta fina ou água é retirado do banho-maria da membrana cilíndrica (deverá ser pesado seco) e a membrana do banho-maria é removida do topo do molde.

As características atrativas do método de deposição em polpa segundo Kuerbis & Vaid (1988) são: 1) a amostra de areia permanece totalmente saturada em água desaerada; 2) a preparação da amostra é normalmente concluída em cerca de 1,5 hora; 3) a amostra é misturada completamente como uma pasta magra saturada com pouco excesso de água de poros, de modo a minimizar a altura de queda de partículas através da água durante a deposição e, assim, controlar as correntes de sedimentação e a segregação do tamanho das partículas durante a deposição; 4) o método forma amostras inicialmente soltas (geralmente um pouco mais soltas do que areias não segregadas obtidas por simples pluviação através da água) que podem ser densificadas uniformemente por vibração mecânica; 5) as amostras são excepcionalmente homogêneas em relação à razão de vazios e à gradação do tamanho das partículas; independentemente da gradação e teor de finos; e 6) o método de deposição modela o arranjo das partículas do solo encontrado dentro de um depósito de enchimento hidráulico.

Para reconstituir provetes Carraro (2008) se baseou no método de Kuerbis (1988), modificando algumas etapas, com o objetivo principal de minimizar o tempo de preparação e melhorar a precisão da quantidade de finos presentes. O processo utilizado pelo autor está descrito a seguir.

(1) Uma membrana de látex (foi usada uma membrana de 0,3 mm de espessura) é colocada em torno da placa de base triaxial e fixada por dois o-rings. O molde bipartido é então montado ao redor da membrana. A parte superior da membrana é enrolada sobre a parte superior do molde e o vácuo é aplicado para eliminar o espaço de ar entre o molde e a membrana.

Capítulo 2

(2) Os materiais secos são calculados e pesados com base no teor de finos final desejado da mistura (Figura 15a). As frações pesadas de areia e finos são colocadas dentro de um recipiente fechado (Figura 15b) e misturado vigorosamente até a homogeneidade da mistura seca ser observada (Figura 15c).

(3) Um tubo cilíndrico de acrílico fechado na parte inferior com uma rolha de borracha é enchido até a metade com água desaerada. Um funil é colocado na extremidade superior do tubo. A mistura seca é despejada através do funil muito lentamente para minimizar o aprisionamento de bolhas de ar (Figura 15d). O funil é removido, o tubo é preenchido com água desaerada. Outra rolha de borracha, que tem uma válvula presa ao seu centro, é usada para vedar a extremidade superior do tubo.

(4) O tubo é agitado virando-o repetidamente de cabeça para baixo (Figura 15e) e girando-o em torno de seu eixo. O tubo é então colocado de volta na bancada de preparação, a tampa de borracha superior é removida e o tubo é completado com água desaerada. Esta etapa pode ser repetida várias vezes até que todas as bolhas de ar visíveis sejam removidas da amostra.

(5) O tubo é agitado até que a homogeneidade da mistura seja alcançada (aproximadamente vinte minutos) (Figura 15e). A rolha de borracha superior é então removida, o tubo é completado com água desaerada. São colocados um papel filtro e uma pedra porosa de 3 mm de espessura para selar a extremidade aberta do tubo (Figura 15f). O tubo é virado de cabeça para baixo para que o papel filtro e a pedra possam selar por sucção o fundo do tubo (Figura 15g). Todo o conjunto é então colocado verticalmente dentro do molde, o espaço entre o tubo e a membrana é preenchido com água desaerada (Figura 15h), e a mistura é deixada assentar dentro do tubo por cerca de 20 min (Figura 15i).

(6) A tampa de borracha superior é retirada e os finos restantes na parte superior do tubo são removidos (Figura 15j). Um colar é encaixado próximo ao topo do tubo e o espaço entre o tubo e o colar é preenchido com água desaerada (Figura 15k). Em seguida, o tubo é retirado lenta e firmemente (Figura 15l). O colar é nivelado (Figura 15m).

(7) O colar é removido e o topo do molde é nivelado (Figura 15n) suavemente para minimizar a perturbação do topo do provete. A seção da membrana que está rolada sobre o molde (passo 1) é completamente limpa de quaisquer partículas e o bloco de

topo é colocado no lugar. A membrana é enrolada nas laterais do bloco de topo e fixada no lugar por dois o-rings. A linha de drenagem superior é conectada ao bloco de topo, isolando completamente o provete do lado de fora.

(8) O vácuo é aplicado ao provete lenta e incrementalmente (até um máximo de cerca de 20–25 kPa para minimizar a super consolidação do topo do provete). Após a aplicação do nível de vácuo desejado, o molde bipartido é removido e quaisquer partículas que permaneçam presas à membrana são lavadas para que a amostra possa ser inspecionada visualmente quanto a defeitos.

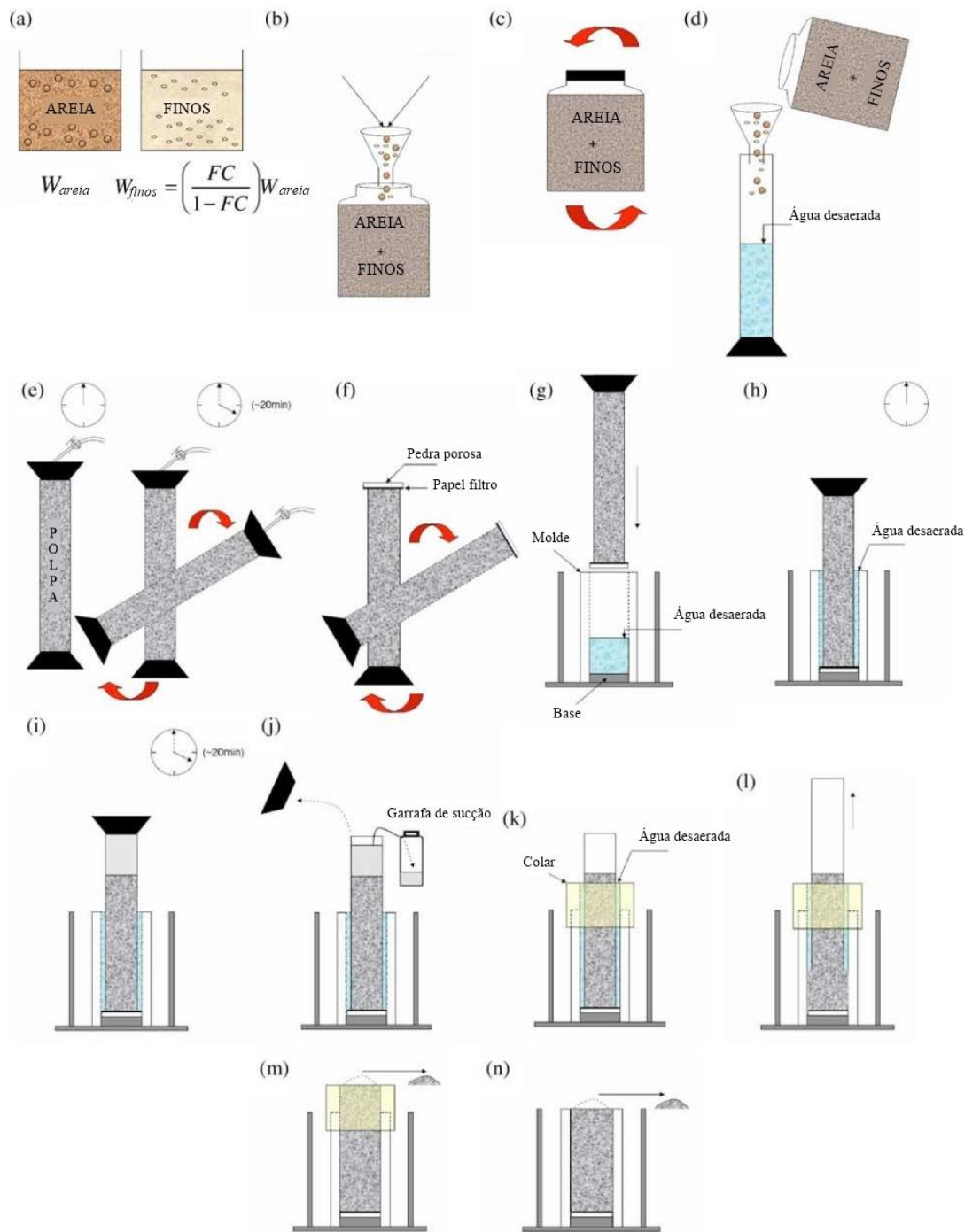


Figura 15 - Procedimento para deposição em polpa, adaptado de Carraro & Prezzi (2008).

Os provetes obtidos segundo essa técnica mostraram-se excepcionalmente homogêneos em relação ao índice de vazios e granulometria, independentemente da graduação e do teor de finos. Assim, esse método provou ser eficaz na preparação de provetes de silte/areia homogêneos, uniformes e replicáveis sem segregação.

Ainda segundo Carraro & Prezzi (2008) o método proposto (i) reduz significativamente o nível de contrapressão necessário para saturar completamente as

amostras e (ii) elimina a necessidade de procedimentos de saturação mais complexos (percolação de CO₂ e água desaerada através da amostra) que provavelmente perturbam o delicado arranjo das partículas dos provetes e/ou afetam a determinação precisa de seus parâmetros de estado inicial do solo (razão de vazios inicial ou densidade relativa). Esses procedimentos de saturação adicionais são normalmente necessários nas técnicas de reconstituição de amostras AP e MT.

Corrêa (2018) se baseou no método de (Carraro & Prezzi, 2008), com modificações e adições de Abreu et al. (2016) para recriar seus provetes. As principais modificações no método estão descritas a seguir.

No método de Carraro & Prezzi (2008), o tubo cilíndrico é virado de cabeça para baixo e baixado dentro do molde. Neste caso, o papel de filtro e pedra porosa devem estar em perfeito contato com o material da coluna para gerar junto com ela sucção no tombamento. Segundo Abreu et al. (2016), esta condição de sucção e sua permanência até a colocação do tubo virado no molde mostrou-se de difícil obtenção. Sendo assim foi proposta uma modificação no procedimento ao colocar a base e o molde de cabeça para baixo no topo do tubo de acrílico preenchido com a polpa, e então retornaram o conjunto para a posição normal da base triaxial, deixando o cilindro de cabeça para baixo no final do procedimento.

Corrêa (2018) propôs outra modificação, na qual a base continuou a ser colocada de cabeça para baixo no topo do cilindro, mas a membrana que já estava fixada na base através do *o-ring* deve ser introduzida e estendida por fora do tubo com a polpa (Figura 16a), envolvendo o cilindro até se encaixarem perfeitamente a base e topo da coluna (Figura 16b). Apenas nesse momento o molde é montado no sistema de cabeça para baixo (Figura 16c). Devido ao tempo que o cilindro fica na posição invertida ocorrerá sedimentação e provável segregação, com a parte mais fina na altura que forma o provete após a inversão do conjunto. Deve-se, então com o sistema completo (base, molde e cilindro) tombá-lo mais algumas vezes, agitando-o novamente e golpeando a parede com martelo de borracha ou com a mão fechada se houver embuchamento de modo a restabelecer a mistura homogênea da polpa (Figura 16d). Todo o cuidado deve ser tomado para não desencaijar as partes, evitando-se o vazamento de material. Após esta montagem e re-agitação, todo o sistema deve retornar à posição normal da base triaxial, deixando o cilindro de cabeça para baixo (Figura 16e). Deve-se então dobrar a membrana na parte superior do molde e ligar a linha de

vácuo ao molde para que haja aderência da membrana à parede interna do molde (Figura 16f).

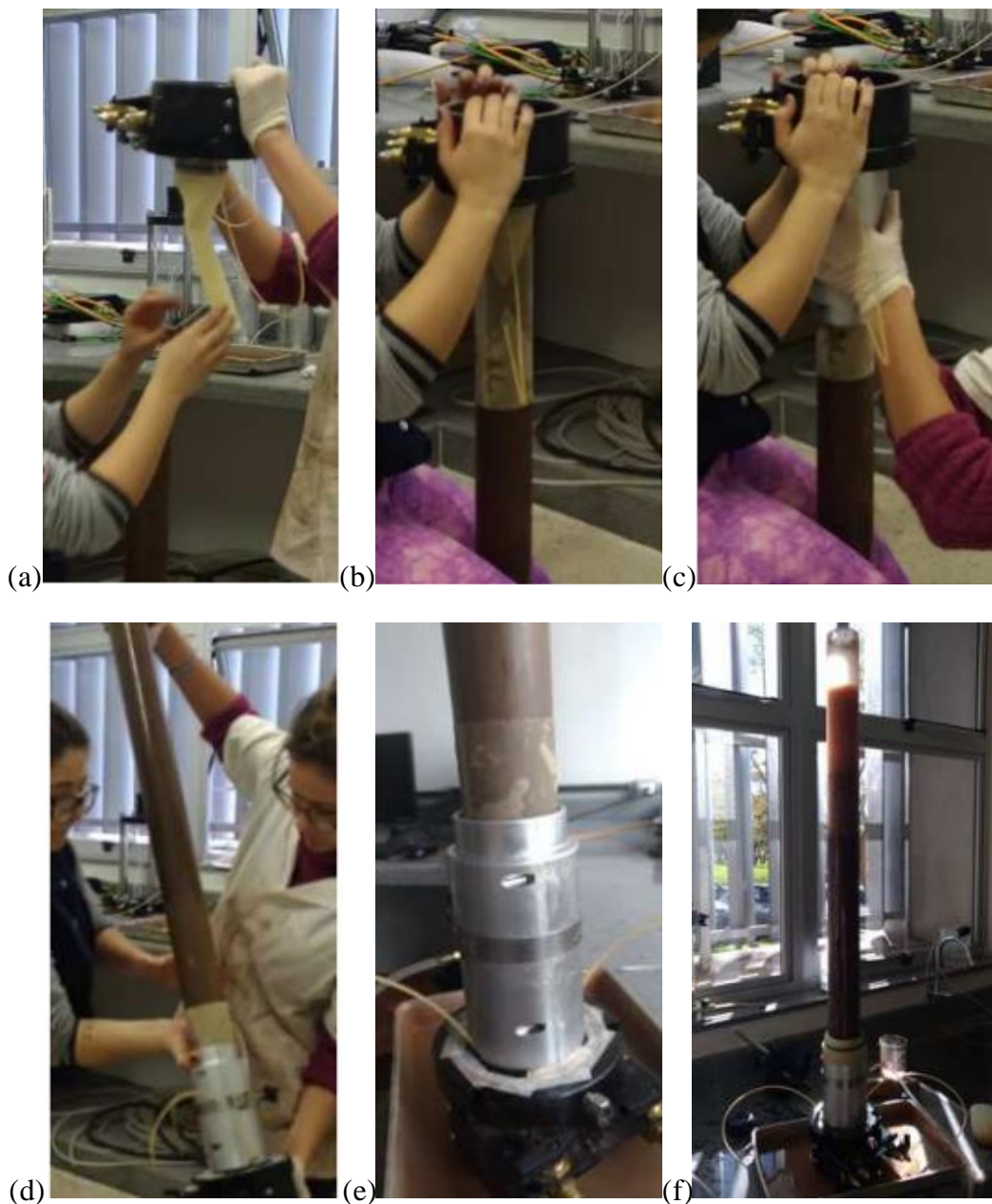


Figura 16 - Procedimentos do método SD desenvolvido por Corrêa (Corrêa, 2018).

O resultado da aplicação da técnica SD foi capaz de produzir provetes dentro de certa faixa de densidade. A mínima densidade seca obtida foi de $1,54 \text{ g/cm}^3$, e não foram testadas densidade superiores a $1,61 \text{ g/cm}^3$. Na Figura 17 é apresentada a relação existente entre a densidade total da polpa e a densidade seca dos provetes obtidos para cada ensaio. Percebe-se que a densidade seca do provete guarda certa proporção à densidade total da polpa. Quanto menor o teor de sólidos da polpa menor também será a

densidade seca do provete. Pode-se observar que a limitação para densidades menores parece ficar por conta da altura do tubo.

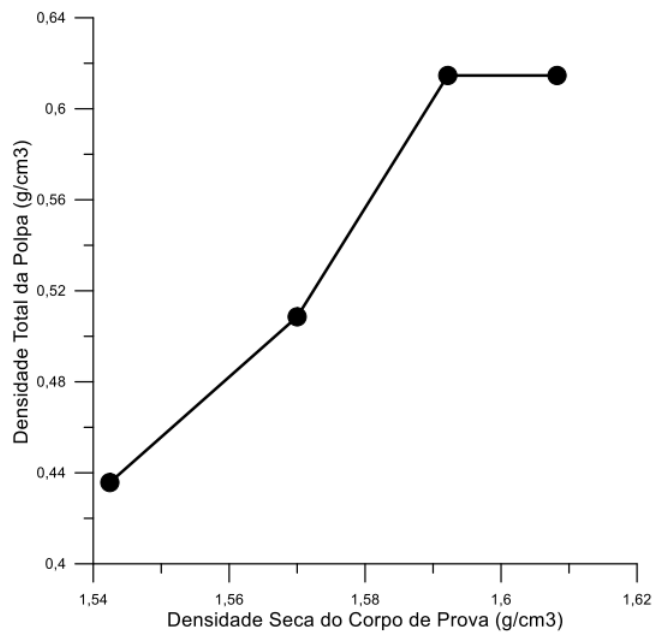


Figura 17 - Densidade seca dos provetes ensaiados x densidade total da polpa, (Corrêa, 2018).

Jorge (2020) modificou o método para recriar provetes com as dimensões de 69,0 mm de diâmetro e 144,0 mm de altura. Seu objetivo era reproduzir o processo de sedimentação e para tal desenvolveu um mecanismo para reconstituir provetes através da sedimentação natural. O equipamento desenvolvido (Figura 18) foi constituído por um tubo metálico e um anel de contenção, de forma a auxiliar a selagem do tubo, e um tubo de P.V.C encaixado sobre ele. Os tubos foram colocados sobre uma base metálica com papel de filtro. De forma a criar estabilidade à estrutura foi criado um topo metálico que permitiu fazer a ligação com a base, através de dois esticadores. Para reconstituir um provete foi necessário acrescentar uma membrana no tubo inferior e, de seguida, colocou-se o material através da abertura do topo metálico.



Figura 18 - Equipamento para reconstituição de provetes (Jorge, 2020).

Para colocar os rejeitados recorreu-se a uma mangueira e a um funil. O material foi depositado, lentamente, de modo a que não houvesse a criação de bolhas de ar. A técnica mostrou-se capaz de reconstituir provetes para a realização de ensaios triaxiais. No entanto, de modo a não criar vibrações e danificar o provete, esta técnica teve de ser montada sobre o pedestal. A sedimentação sobre o pedestal foi um processo mais demorado devido à área de drenagem ser inferior. Inicialmente, a estrutura foi montada no chão de forma a facilitar a transferência do material homogeneizado para o seu interior. De seguida, o equipamento foi colocado numa bancada para iniciar-se a drenagem da água.

Após estar cerca de uma semana a sedimentar, o equipamento foi desmontado. Inicialmente retiraram-se os esticadores depois, o topo metálico. Ao retirar os esticadores, foi necessário ter algum cuidado de modo a que o tubo superior não tombasse e danificasse a membrana de látex. Posteriormente, retirou-se o tubo superior.

De modo a colocar a placa de topo do pedestal, foi necessário retirar os excessos do material sedimentado e limpar as partes laterais da membrana suavemente para não a furar com as partículas. A limpeza da membrana é necessária para que os o-rings consigam vedar e não haja nenhuma fuga.

Após limpar a membrana e o topo do provete regularizado, colocou-se a placa de topo com as rodela de látex e o papel de filtro. O provete final ficou com o aspeto representado na Figura 19.



Figura 19 - Aspeto final do provete reconstituído (Jorge, 2020).

Este método de reconstituição, teve uma série de dificuldades pois, nem sempre foi possível reconstituir um provete para avançar na realização de ensaios triaxiais. Geralmente, a causa mais habitual que não tornou possível esta reconstituição foram os pequenos furos que surgiram na membrana. Uma das causas mais prováveis que deu origem a este problema, ocorreu durante a transferência dos rejeitados através da mangueira que ao friccionar na membrana rompeu-a. Outra das causas mais prováveis foi o atrito na saliência entre a junção do tubo superior com o molde metálico, furando a membrana que envolve o provete.

Segundo Abreu et al. (2016), a técnica SD é a mais adequada na reconstituição de rejeitados oriundos de depósitos de enchimento hidráulico com propensão à liquefação. Essa vantagem por ser explicada pelo tipo de sedimentação das partículas de areia e silte em água, gerando um arranjo de partículas semelhante àquele *in situ*. Além disso, ela se mostra superior às técnicas de WP convencionais por lidar melhor com materiais que contêm finos, como costuma ocorrer com rejeitados de minas, e também porque permite obter corpos de prova homogêneos.

Capítulo 2

A técnica SD incorpora algumas características desejáveis da técnica WP, como a sedimentação das partículas, permitindo a simulação do arranjo das partículas do material *in situ*, mas é menos propícia à segregação do material, além de possibilitar uma saturação inicial (Carraro & Prezzi, 2008).

A eficácia da técnica SD para produzir provetes não segregados depende de dois fatores, sendo um deles trabalhar com teores de sólidos médios a altos e uma coluna de material sedimentado relativamente alta comparada à altura do provete a ser formado. Assim, a mistura inicial homogênea e a proximidade entre partículas limitam o movimento relativo entre elas durante a sedimentação, fato este mais observado na base da coluna sedimentada, na região de interesse da formação do provete. Independentemente de qualquer diferença de tamanho ou densidade que possa haver, a segregação de partículas é minimizada na parte baixa da coluna, ao contrário da WP convencional (Corrêa, 2018). Este fato foi comprovado experimentalmente por Carraro & Prezzi (2008) onde os corpos de prova para ensaios triaxiais foram seccionados em diversas alturas e tiveram densidades e granulometria estudados, observando-se ótima uniformidade e homogeneidade nos resultados.

3. PROPRIEDADES BÁSICAS DOS MATERIAIS

Neste capítulo são apresentadas as propriedades básicas dos materiais estudados, como, a granulometria dos materiais, os limites de Atterberg e as densidades de partículas sólidas. Nos itens a seguir são descritos todos os procedimentos realizados e normas utilizadas para obter tais dados. Os ensaios foram todos realizados nas instalações do laboratório de geotecnia da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu.

3.1. Origem dos Materiais

O primeiro e mais importante material estudado trata-se de um subproduto do processo de mineração em que o jazigo de extração se estende ao sul da Península Ibérica. 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. O material apresenta coloração acinzentada escura e textura fina, sendo denominado como Rejeitado 1 (RJ1) (Figura 20).



Figura 20 – Rejeitado 1 (RJ1)

Outros dois materiais foram estudados, os quais são resultantes do processo de britagem de pedra de granito. Estes materiais foram utilizados devido ao nível de toxicidade, como presença de óxidos e químicos, do rejeitado, e também para estender o âmbito do estudo a outros materiais que não apenas o rejeitado mineiro disponível para o estudo.

Deu-se os nomes aos materiais de Pó de Pedra 1 (PP1) e Pó de Pedra 2 (PP2). O material PP1 apresenta aspeto similar ao pó de gesso, de cor branca e textura fina, enquanto o material PP2 possui coloração mais escura (Figura 21).



Figura 21 - Pó de pedra 1 (PP1) e Pó de Pedra 2 (PP2), respetivamente

3.2. Análise Granulométrica

A mineralogia da rocha, mais o processo de extração e processamento, definem a característica granulométrica dos resíduos de mineração. Como estas características variam de região para região e mesmo de indústrias para indústrias, é difícil determinar uma curva granulométrica característica para este tipo de material, no máximo podendo ser definida uma faixa de variação da mesma (Bedin, 2010).

A granulometria é uma das características físicas mais importantes do solo, pois inúmeras propriedades geotécnicas são relacionadas à granulometria. Para solos com mais de 10 % do seu peso formado por finos, como o solo estudado, é indicado utilizar

uma combinação de peneiração e sedimentação. A determinação das curvas granulométricas foi efetuada recorrendo à peneiração e sedimentação, tal como definido na norma ISO/TS 17892-4:2004 (CEN, 2004b)

3.3.2 Peneiração

Os equipamentos utilizados no processo de peneiração foram os peneiros com as graduações 2,00 mm, 1,00 mm, 500 μm , 250 μm , 125 μm e 63 μm , balança de precisão, estufa de secagem, bandejas de metal resistentes à corrosão. O procedimento utilizado para realizar a peneiração está descrito na Figura 22.

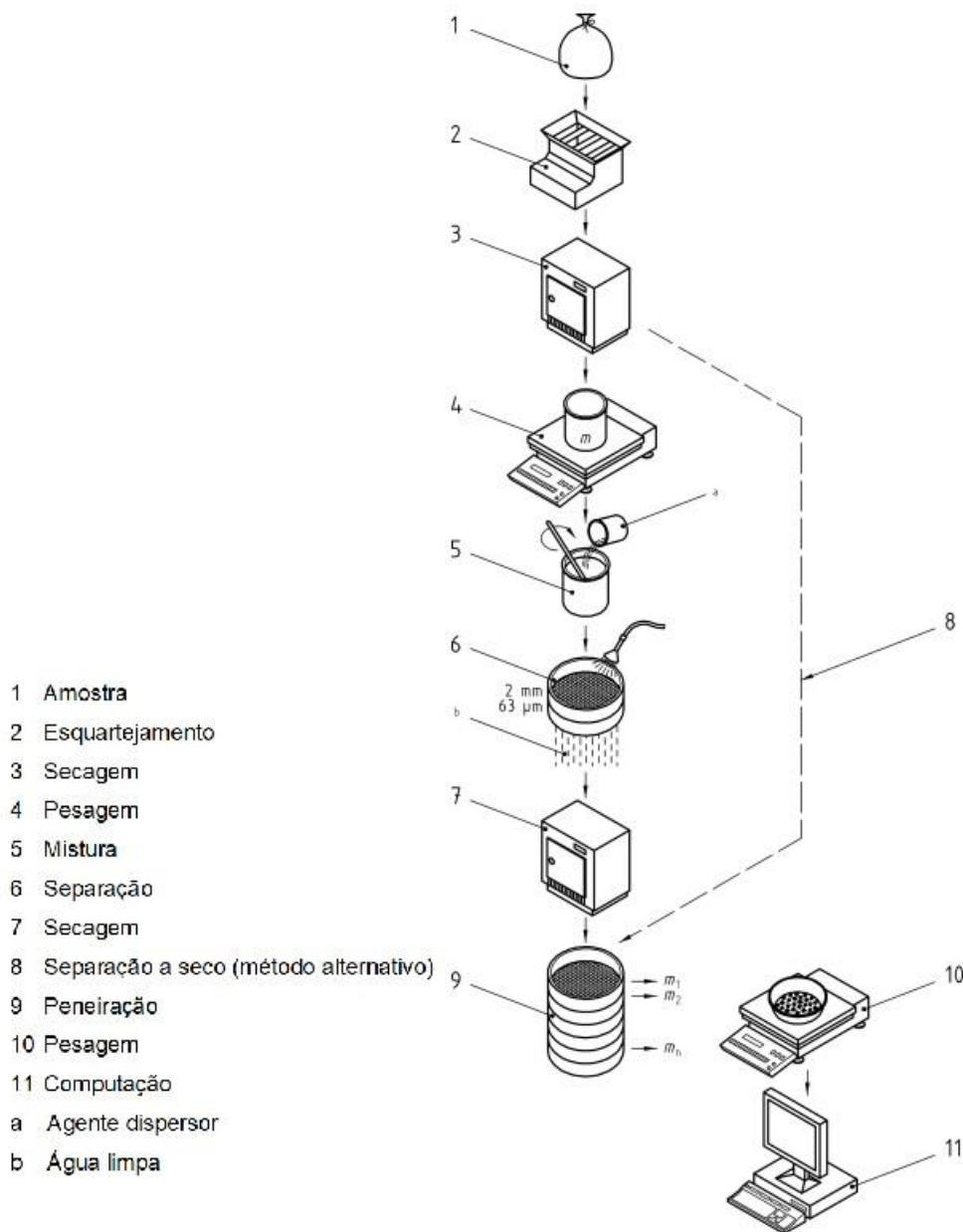


Figura 22 - Procedimento executado para a peneiração, adaptado de ISO/TS 17892-4:2004 (CEN, 2004b).

A massa mínima requerida para a peneiração é determinada segundo o peneiro de menor malha pelo qual 90 % ou mais das partículas irão passar, chamado de D90. Para o ensaio foram utilizadas 150 g de material e a peneiração foi feita com a amostra húmida, pois ela possui mais de 10% de finos. Neste contexto consideram-se finos os materiais passantes pela peneira de 63 μm .

O material foi misturado a 100 ml de solução de hexametáfosfato de sódio na concentração de 2 g/l e 100 ml de água destilada. Esta mistura foi levada ao dispersor mecânico e agitada durante 20 minutos e, em seguida, permaneceu por outros 40 minutos no mesmo recipiente, sendo agitado manualmente.

A mistura foi lavada nas peneiras de 2 mm e de 63 μm em conjunto até a água escorrer limpa. O material retido nas peneiras foi recolhido e seco à temperatura de 105°C e em seguida foi realizado o processo de peneiração por um período de 10 minutos, como está representado na Figura 23. Os peneiros utilizados foram somente os da série fina, pois não foram retidos grãos da série grossa. Foram utilizados os peneiros de 250 μm , 125 μm e 63 μm .



Figura 23 - Peneiração com o auxílio de agitador mecânico

Após a peneiração com o agitador mecânico a massa retida em cada peneira foi registrada e os cálculos realizados para determinar a percentagem acumulada de massa que passa em cada peneiro, como descrito na Equação 1

$$f_n = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{m_t} * 100\% \quad (1)$$

Onde:

fn = fração que passa na peneira (%);

$m1$ = massa seca de solo que passa pelo menor tamanho de malha (g);

$m2, mn$ = massa seca de solo que passa pelas peneiras de malha consecutivas (g);

mt = massa total da amostra seca (g).

3.3.3 Sedimentação

Como os materiais estudados possuem uma quantidade considerável de finos (mais de 80%) foi necessário realizar o ensaio de sedimentação, pelo método do densímetro, complementando a sua análise granulométrica. Segundo a norma ISO/TS 17892-4:2004 (CEN, 2004b), é necessário fazer a calibração do densímetro utilizado, porém foi utilizado um densímetro já calibrado.

A quantidade de cada material que compõe os provetes obtidos foi determinado conforme a Tabela 2, em que os materiais foram classificados como coesivos, com pouca ou nenhuma areia, sendo os provetes para todos os materiais de 50 g.

Tabela 2 - Massa seca do provete de solo para ensaio de sedimentação, adaptado de ISO/TS 17892-4:2004 (CEN, 2004b).

| Tipo de solo | Massa seca de solo g |
|--|---------------------------------|
| Solo contendo areia | até 75 |
| Solo coesivo, com pouca ou nenhuma areia | 30 a 50 |
| Argila muito plástica a plástica | 10 a 30 |

Para cada material estudado o procedimento realizado foi o mesmo. O material foi colocado em um frasco cônico juntamente com 100 ml de solução dispersante (hexametáfosfato de sódio com concentração 40 g/l) e agitado durante 20 minutos em misturador mecânico (Figura 24). A mistura foi despejada sobre o peneiro de 63 μ m, posicionado sobre um recipiente com capacidade de aproximadamente 1000 ml.



Figura 24 - Provete sendo misturado com o auxílio de misturador mecânico

O provete foi lavado com um jato de água, que não excedeu o volume de 800 ml (Figura 25). O material retido no peneiro foi recolhido e seco em estufa. A mistura passante foi colocada em uma proveta com capacidade de 1000 ml onde a suspensão repousou por no mínimo 12 h. Outra proveta foi preparada com uma solução de referência, composta por 100 ml da mesma solução dispersante e 900 ml de água.



Figura 25 - Provete sendo lavado no peneiro de 63 μm

Após o repouso, a suspensão foi agitada vigorosamente pelo período de 2 minutos e o cronômetro foi iniciado quando a proveta foi colocada sobre a bancada. Leituras com o auxílio do densímetro e do termômetro foram realizadas em tempos pré-

definidos, como indicado na norma. Os tempos utilizados para a realização do ensaio foram 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. Na Figura 26 são apresentadas as provetas durante a execução do ensaio do RJ1. No início do ensaio (Figura 26a) a proveta que possui o material está com uma coloração mais escura, representando que o material ainda não sedimentou. Após 15 minutos terem se passado (Figura 26b) o material sofreu uma grande sedimentação, o que é aparente pela mudança na cor da suspensão, ficando mais translúcida.

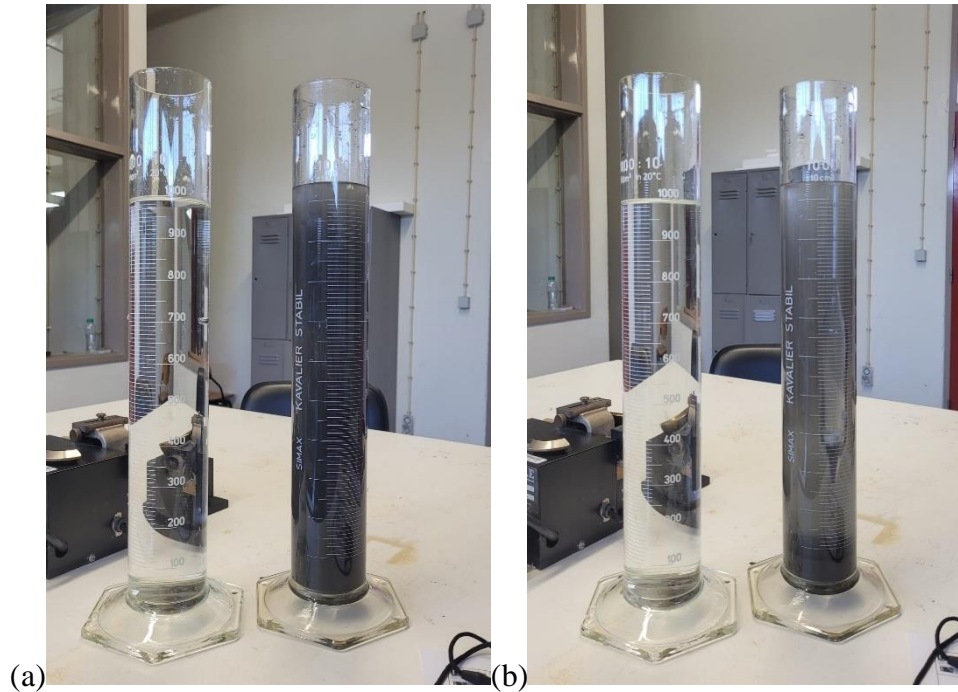


Figura 26 – Análise granulométrica por sedimentação do rejeitado RJ1: a) no início da contagem dos tempos; b) 15 min após o início da contagem

3.3.4 Resultados e Análise

Com os resultados obtidos em ambos os ensaios descritos, peneiração e sedimentação, é gerada a curva granulométrica do material, definida pelo diâmetro das partículas no eixo das abcissas, em escala logarítmica, e pelo percentual de material que passa pelo peneiro no eixo das ordenadas, em escala linear. A curva deve ser contínua, porém os resultados da peneiração são priorizados caso houver uma descontinuidade entre as curvas de peneiramento e sedimentação.

Os materiais estudados são muito finos, portanto as partículas retidas nos peneiros de abertura igual ou superior a 63 μm são pouco relevantes em relação à amostra total. Para o rejeitado RJ1, as dimensões das partículas variaram entre 63 μm e

Capítulo 3

0,8 μm , sendo predominante a presença de finos (silte e argila), correspondendo a 97,7% de todo o material. 93,7% do material é formado por silte, seguido de 4,0% de argila e os restantes 2,3% sendo areia fina.

Para o material PP1, 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. É possível observar que o material apresenta granulometria reduzida a finos. A fração de silte corresponde a 80% do material, 13,1% corresponde a areia fina e a fração da argila é a menos predominante, com 6,9% do total.

Para o material PP2, as dimensões das partículas variam entre 125 μm e 1,2 μm , sendo que 94,1% representa o material fino constituído por silte e argila. É possível observar que o material apresenta granulometria reduzida a finos. A fração de silte corresponde a 76,2% do material, 5,9% corresponde a areia fina e a fração da argila corresponde a 17,9% do total. Na Figura 27 estão representadas as curvas granulométricas dos três materiais estudados.

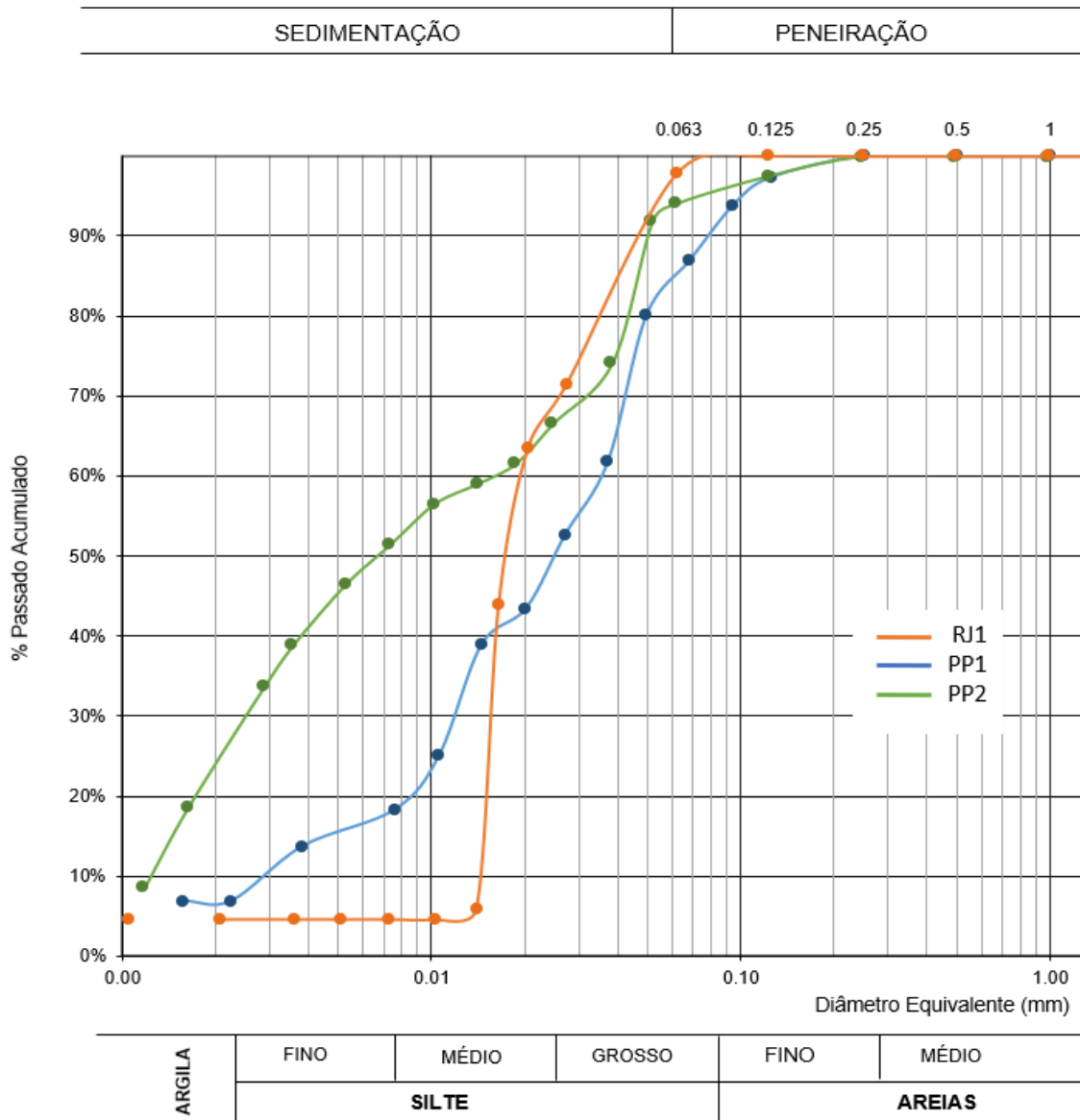


Figura 27 - Gráfico das granulometrias dos materiais RJ1, PP1 E PP2

3.3. Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg, limite de liquidez e limite de plasticidade, foram determinados com base na norma NP 143 (1969). Nestes ensaios o solo é analisado em circunstâncias totalmente diferentes das encontradas *in situ*. As amostras de solo são remisturadas com água e remexidas, modificando o arranjo inicial das partículas e o teor em água natural (Matos Fernandes, 2011).

O limite de liquidez (LL) de uma amostra de solo é definido como o teor em água correspondente a 25 pancadas, obtido por interpolação numa curva que relaciona o

teor em água de cada um de 4 provetes da amostra com o número de pancadas para o qual os bordos inferiores de um sulco aberto num provete se unem numa extensão de 1 cm, feito na concha de Casagrande. (NP 143, 1969).

As amostras ensaiadas passaram pelo peneiro de 420 μm , sendo que o material passante foi o utilizado para determinar o limite de liquidez. Um provete de 100 g foi obtido e amassado à espátula com água destilada até formar uma pasta homogênea e consistente. Tomou-se uma porção desta pasta que foi colocada na concha de Casagrande, com a espessura máxima de 1 cm e superfície nivelada, e um sulco foi feito deslocando o riscador adequado, como apresenta a Figura 28.



Figura 28 - Ensaio de limite de liquidez na Concha de Casagrande do material PP2

O número de pancadas necessárias para que o sulco se feche numa extensão de 1 cm foi anotado e uma porção do provete da região do sulco foi retirada para determinar seu teor em água. São realizadas quatro vezes ao todo este processo, ajustando-se o teor em água por forma a gerar números de pancadas diferentes, que variem entre 10 e 40.

O limite de plasticidade (LP) é definido 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.

Uma amostra de 20 g que passou pelo peneiro de 420 μm foi amassada à espátula com água destilada e, a seguir, quatro esferas de diâmetros sensivelmente iguais foram formadas. Cada uma das esferas foi rolada entre a palma da mão e uma

placa de vidro até formar-se um filamento de 3 mm. O provete foi formado em esfera novamente e rolado, até perder humidade suficiente para que o filamento de 3 mm de espessura se quebre ao formar-se. Neste momento, foi determinado o teor em água. Este processo foi realizado para cada material estudado. Na Figura 29 são apresentados os passos descritos.



Figura 29 - Ensaio de limite de plasticidade do rejeitado RJ1

Para a obtenção do valor do limite de liquidez foram ensaiados 4 provetes para cada material, como indicado pela norma NP 143 (1969).

Os dados obtidos para o RJ1 estão apresentados na Tabela 3. Com estas informações foi possível gerar um gráfico (Figura 30) no qual a interseção do teor em água com o número de 25 pancadas se refere ao limite de liquidez. Sendo assim, o LL obtido foi de 21%.

Tabela 3 - Dados obtidos com o ensaio de limite de liquidez do RJ1

| 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 húmido | 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 | 8.377 | 6.008 | 7.724 | 7.547 |
| $W_w=m_2-m_3$ | Massa da água | g | 1.826 | 1.205 | 1.620 | 1.476 |
| $w=(W_w/W_s) \times 100$ | Teor em água | % | 21.802 | 20.055 | 20.968 | 19.557 |
| N - NÚMERO DE PANCADAS | | | 21 | 39 | 22 | 30 |

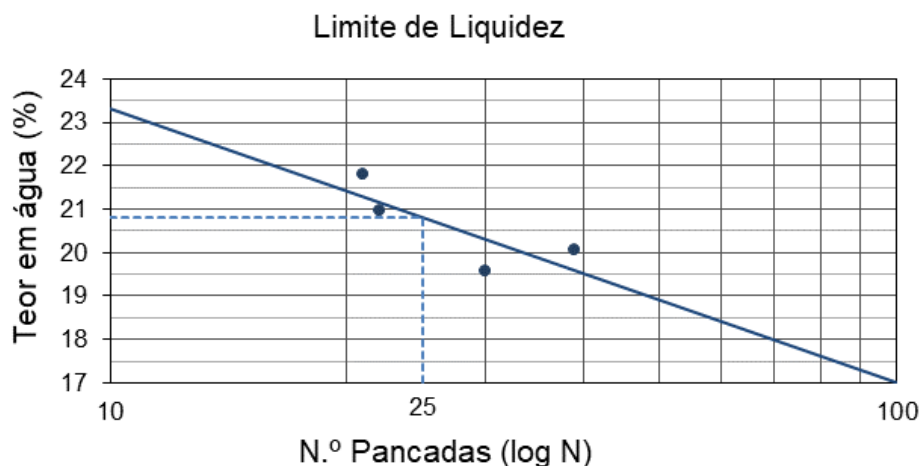


Figura 30 - Gráfico do resultado do ensaio do limite de liquidez do RJ1

Quanto ao limite de plasticidade, seu valor é correspondente à média dos teores em água dos provetes ensaiados, os valores obtidos para o rejeitado estão apresentados na Tabela 4 a seguir. O valor do limite de plasticidade obtido para o rejeitado estudado foi de 21%.

Tabela 4 - Resultados obtidos no ensaio de limite de plasticidade do RJ1

| 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 húmido | 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 | | (%) | 20.73 | | | |

Portanto, ambos os valores obtidos para o limite de liquidez e limite de plasticidade correspondem a 21%. Sendo assim, é possível concluir que o material é não plástico. Destaca-se que um solo com limites de liquidez e de plasticidade muito próximos tendem a ter pouca presença de argila (abaixo de 10%), confirmando a relevância do ensaio de sedimentação.

Não foi possível realizar os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade para os materiais PP1 e PP2, pois notou-se baixo potencial higroscópico, ou seja, dificuldade na retenção de água por meio das partículas. Dessa forma, estes materiais são classificados como materiais não plásticos.

3.4. Densidade de Partículas Sólidas

Determinar a densidade das partículas sólidas é de grande interesse para o estudo de rejeitados mineiros. Por ser um material com grande quantidade de compostos metálicos sua densidade se encontra geralmente acima daquela obtida em solos naturais, que se mantém por volta de 2,7 (Raposo, 2016). Para determinar a densidade de partículas sólidas do rejeitado foi utilizada a norma ISO/TS 17892-3:2004 (CEN, 2004a), a qual descreve o método do picnómetro. O método do picnómetro é baseado na determinação do volume de uma massa de solo conhecida, pelo método de deslocamento.

O picnómetro deve ter um volume de pelo menos 50 ml. Os picnómetros utilizados tinham volume de 100 ml (Figura 31). O primeiro passo do ensaio é a calibração dos picnómetros utilizados. A massa seca de cada um foi aferida, com precisão de 0,001 g. Os picnómetros foram cheios de água destilada, de forma a não haver bolhas no seu interior. Uma bomba de vácuo foi utilizada para remover quaisquer bolhas. A temperatura da água foi determinada e o conjunto foi fechado, de modo que a água destilada chegasse à altura da marca de medição. Por fim, a massa do conjunto foi determinada.



Figura 31 - Picnómetros utilizados para determinação da densidade de partículas sólidas

Para a determinação da densidade o material estudado foi seco em estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ até a massa do provete ser constante. A massa seca de cada provete analisado deve ser de, no mínimo, 10 g. O provete foi adicionado ao picnómetro seco e limpo e a massa do conjunto determinada. A seguir adicionou-se água destilada até ela

estar de 10 mm a 20 mm acima do provete. Bolhas de ar que possam vir a ficar na mistura material e água foram removidas. Para tal foi utilizada a bomba de vácuo (Figura 32) por pelo menos 30 minutos. O picnómetro foi agitado algumas vezes durante o processo para auxiliar na remoção do ar. Após removidas as bolhas, o picnómetro foi cheio de água até a marcação e sua massa medida (Figura 33 e Figura 34), com precisão de 0,001 g, sendo a temperatura também medida.



Figura 32 – Remoção de bolhas com o auxílio da bomba de vácuo



Figura 33 - Execução do ensaio de determinação da densidade de partículas sólidas



Figura 34 – Aferição da massa do conjunto picnómetro + provete + água destilada

Com os dados obtidos, a Equação 2 foi utilizada para determinar a densidade das partículas sólidas do material. A densidade corrigida da água foi determinada segundo a norma ISO/TS 17892-3:2004 (CEN, 2004a).

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

em que:

m_1 = massa seca do picnómetro (g);

m_1 = massa do conjunto água destilada e picnómetro (g);

m_3 = massa do conjunto provete, água e picnómetro (g);

m_4 = massa seca do provete (g);

ρ_w = densidade da água (g/cm³);

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

A densidade dos grãos (G) indica a relação entre a massa específica das partículas sólidas e a massa específica da água, assim sendo uma grandeza adimensional. A relação é obtida através da Equação 3.

$$G = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (3)$$

Os resultados obtidos com a execução do ensaio de densidade de partículas sólidas para o material RJ1 estão representados na Tabela 5. A densidade das partículas sólidas encontrada para o material foi de 4,104. Este valor de densidade é consideravelmente mais alto que o encontrado para solos de origem natural. Isto se deve pelo fato de os rejeitados possuírem altos teores de metais.

Tabela 5 - Dados obtidos com o ensaio de densidade de partículas sólidas para o RJ1

| Número do picnómetro | | 213 (pc100) | 295 (pc100) | 397 (pc100) |
|--|--|----------------|----------------|----------------|
| m3 | Picnómetro seco (g) | 33.973 | 30.980 | 33.446 |
| m3 | Picnómetro+água destilada (g) | 131.614 | 130.311 | 132.140 |
| m5 | Picnómetro+provetete+água destilada (g) | 144.921 | 148.285 | 145.569 |
| A | Peso da cápsula (g) | 26.054 | 23.512 | 25.633 |
| B | Provetete seco + cápsula (g) | 43.636 | 47.329 | 43.328 |
| m4=B-A | Provetete seco (g) | 17.583 | 23.817 | 17.695 |
| 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 |
| d | Densidade das partículas sólidas | 4.105 | 4.068 | 4.139 |
| Média das densidades das partículas sólidas | | 4.104 | | |

Os resultados obtidos com a execução do ensaio de densidade de partículas sólidas para o material PP1 estão representados na Tabela 6. A densidade das partículas sólidas encontrada para o material foi de 2,554.

Tabela 6 - Dados obtidos com o ensaio de densidade de partículas sólidas para o PP1

| Número do picnómetro | | 213 (pc100) | 295 (pc100) | 397 (pc100) |
|--|--|----------------|----------------|----------------|
| m3 | Picnómetro seco (g) | 33.973 | 30.980 | 33.446 |
| m3 | Picnómetro+água destilada (g) | 131.614 | 130.311 | 132.140 |
| m5 | Picnómetro+provete+água destilada (g) | 148.909 | 148.079 | 149.7038 |
| A | Peso da cápsula (g) | 26.054 | 23.512 | 25.633 |
| B | Provete seco + cápsula (g) | 54.214 | 52.772 | 54.560 |
| m4=B-A | Provete seco (g) | 28.160 | 29.260 | 28.927 |
| 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 |
| d | Densidade das partículas sólidas | 2.584 | 2.539 | 2.538 |
| Média das densidades das partículas sólidas | | | 2.554 | |

Os resultados obtidos com a execução do ensaio de densidade de partículas sólidas para o PP2 estão representados na Tabela 7. A densidade das partículas sólidas encontrada para o material foi de 2,672.

Tabela 7 - Dados obtidos com o ensaio de densidade de partículas sólidas para o PP2

| Número do picnómetro | | 213 (pc100) | 295 (pc100) | 397 (pc100) |
|--|--|----------------|----------------|----------------|
| m3 | Picnómetro seco (g) | 33.971 | 30.956 | 33.446 |
| m3 | Picnómetro+água destilada (g) | 131.634 | 130.328 | 132.140 |
| m5 | Picnómetro+provete+água destilada (g) | 144.061 | 143.954 | 143.568 |
| A | Peso da cápsula (g) | 10.797 | 16.043 | 16.139 |
| B | Provete seco + cápsula (g) | 30.565 | 37.885 | 34.394 |
| m4=B-A | Provete seco (g) | 19.769 | 21.842 | 18.255 |
| t | Temperatura do ensaio (°C) | 17.1 | 17.1 | 17.1 |
| K | Razão entre as densidades da água à temperatura de ensaio e a 20°C | 0.9989 | 0.9989 | 0.9989 |
| d | Densidade das partículas sólidas | 2.690 | 2.655 | 2.671 |
| Média das densidades das partículas sólidas | | | 2.672 | |

4. RECONSTITUIÇÃO DE PROVETES

Como foi discutido anteriormente, é de grande interesse o desenvolvimento de técnicas e metodologias que permitam criar provetes que consigam reproduzir o comportamento real dos rejeitados existentes nas instalações de deposição de rejeitados. Com objetivo a reproduzir o processo de sedimentação que ocorre nas barragens de rejeitados, estudou-se um método para reconstituir provetes através da sedimentação natural.

Os equipamentos utilizados para a reconstituição de provetes foram: um tubo cilíndrico de PVC; um tubo bipartido de metal; o-rings; membrana de látex; papel filtro comum; pedra porosa. Também foram necessários outros equipamentos acessórios: paquímetro; balança KERN PES 15000-1M, carga máxima 15 kg, precisão de 0,1 g; funil; mangueira.

4.1. Molde bipartido

Um molde bipartido de metal foi desenvolvido para auxiliar na reconstituição dos provetes. O molde foi desenhado utilizando-se o software SolidWorks. As dimensões do modelo estão apresentadas na Figura 35.

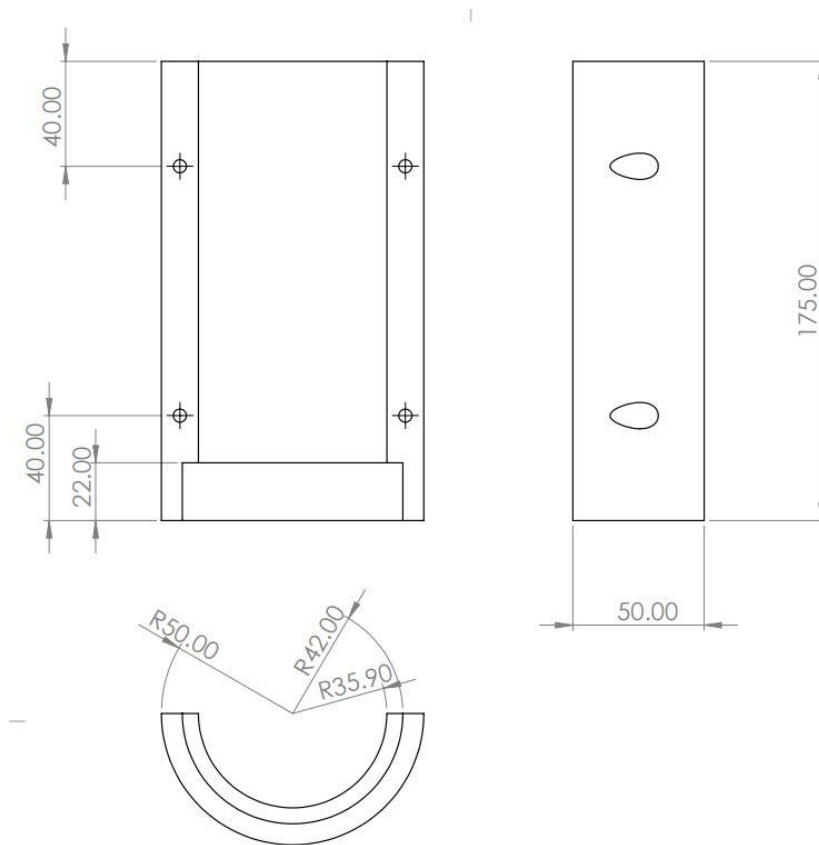


Figura 35 - Dimensões do molde bipartido

Na Figura 36 apresenta-se o modelo em 3D do molde. Ele é composto por dois lados, o quais permitem o fechamento do molde com o auxílio de parafusos.

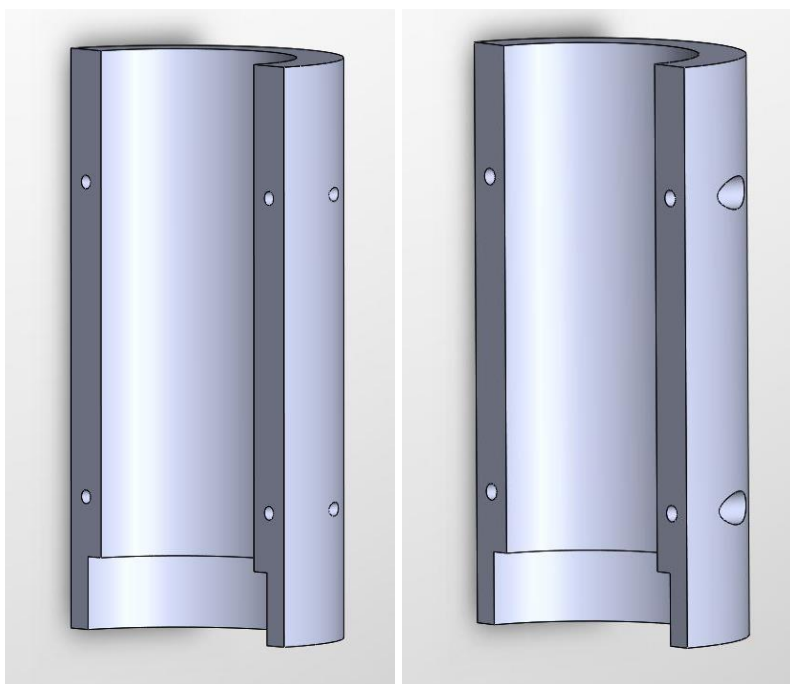


Figura 36 - Modelo em 3D do molde bipartido

O molde foi fabricado em alumínio. Na Figura 37 está apresentado o aspecto final do molde bipartido desenvolvido: a) o molde fechado e b) os dois lados separados.

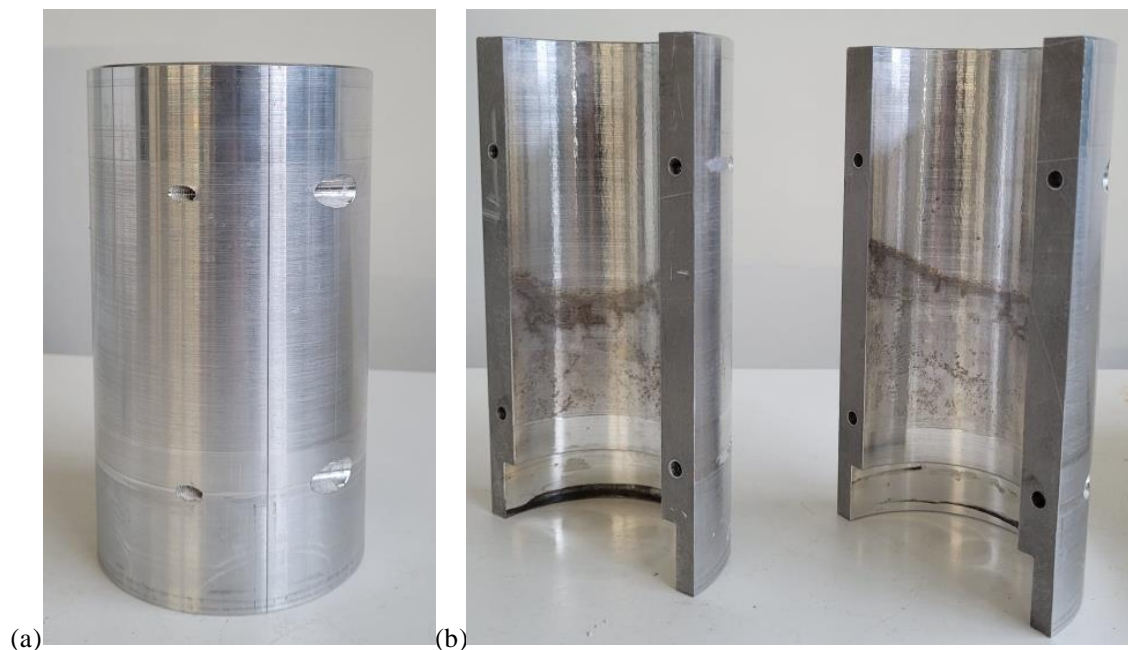


Figura 37 - Molde bipartido fabricado em alumínio

As dimensões internas do molde são: 71,8 mm de diâmetro e 152 mm de altura. Este modelo foi desenvolvido com base nas medidas de uma base para o ensaio triaxial, porém esta base não foi utilizada durante o desenvolvimento da investigação.

Na altura em que se realizou o presente trabalho, não havia uma câmara triaxial disponível. Assim sendo, a solução foi usar uma pedra porosa com diâmetro igual ao da base e utilizar outros equipamentos para dar apoio a ela. Esta solução não é a ideal pois não reproduz a situação real, porém permitiu a continuidade dos ensaios.

As primeiras tentativas de reconstituição de provetes foram feitas utilizando os materiais PP1 e PP2. Estes materiais foram utilizados devido ao nível de toxicidade, como presença de óxidos e químicos, do rejeitado (RJ1). Como foi visto no capítulo anterior estes materiais possuem características similares a do rejeitado, portanto foram utilizados para estudar os procedimentos de reconstituição de provetes antes de realizá-lo com o rejeitado.

4.2. Primeira tentativa de reconstituição

Na primeira tentativa (PROV1) o material utilizado foi o PP1. Foram utilizadas 500 g do material e 333 g de água para formar a mistura que foi despejada no molde. Como o objetivo é tentar reproduzir o processo que ocorre nos depósitos de rejeitado, a consistência da mistura deve ser parecida com a dos rejeitados espessados (Figura 38).

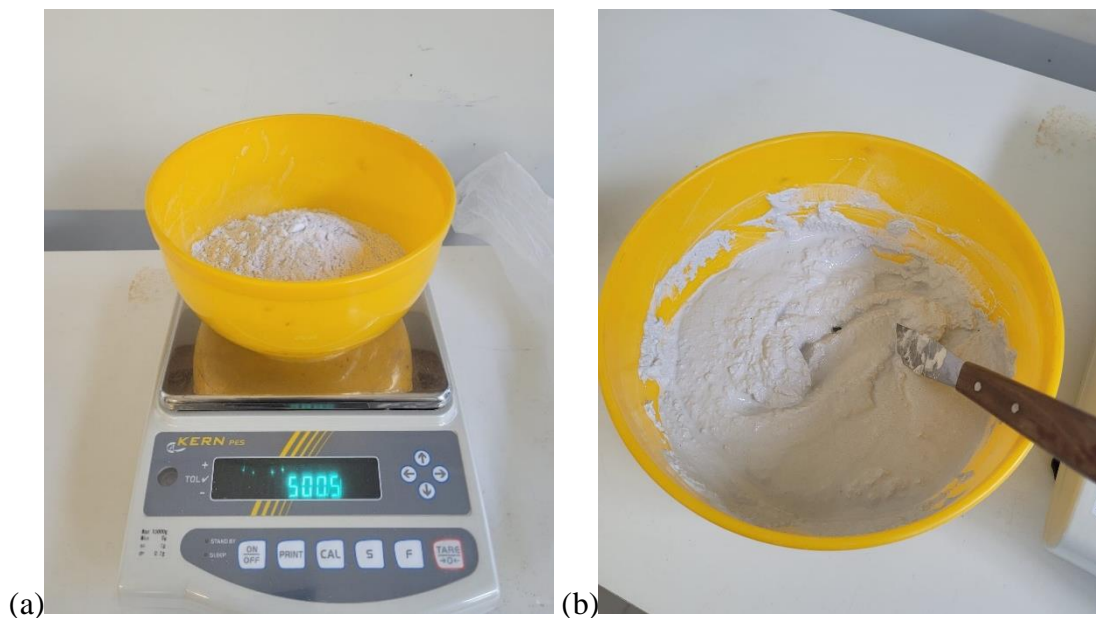


Figura 38 -Pesagem e mistura do material: a) material seco; b) após mistura com água.

Dentro do molde foi colocada a membrana de látex com a pedra porosa encaixada na sua base (Figura 39).

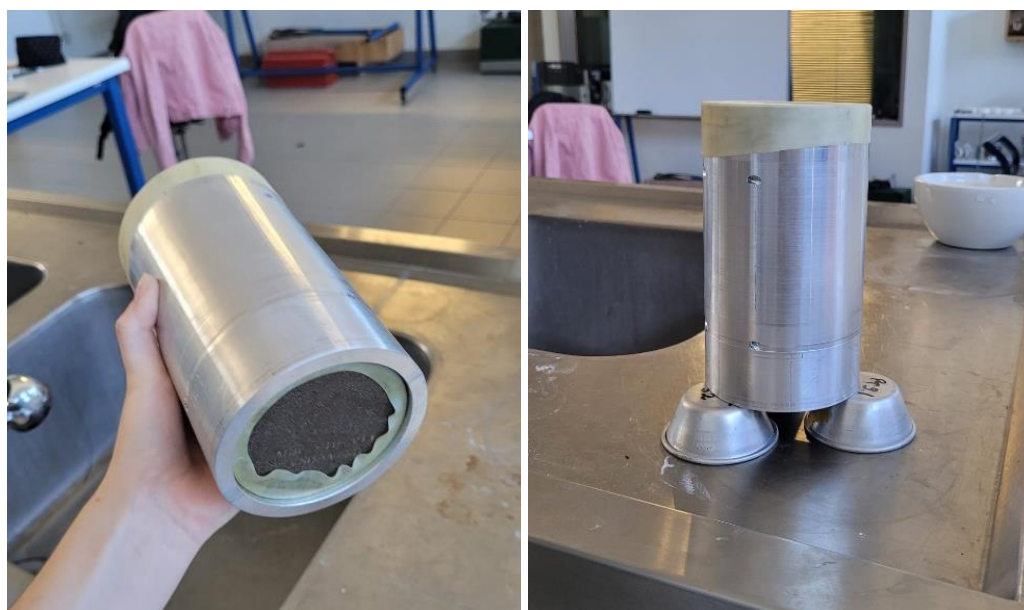


Figura 39 - Molde preparado com pedra porosa e membrana

Colocou-se a mistura dentro do molde (Figura 40a); colocou-se o tubo bipartido de metal sobre o molde; levantou-se a membrana; um o-ring foi utilizado para segurar a membrana e qualquer material que pudesse extravasar pelas bordas da membrana (Figura 40b). O tubo foi preenchido com água que, ao percolar através do provete, contribui para a sua consolidação.



Figura 40 - Montagem do conjunto para sedimentação do PROV1: a) molde com membrana e material; b) com tubo metálico encaixado

O conjunto permaneceu montado durante 4 dias. Neste período, toda a água que havia sido colocada sobre o provete escoou. O tubo bipartido de metal e o molde bipartido foram removidos. O provete ainda estava saturado. A parte inferior estava mais firme que a parte superior do provete. O provete foi mantido com a pedra porosa sob ele, com uma camada de água e papel absorvente sob a pedra. Assim proporcionou-se a absorção por capilaridade, o que auxiliou na remoção do excesso de água (Figura 41).



Figura 41 - Provete PROV1 após o desmolde, sobre uma camada de água

No dia seguinte, o provete estava com um aspeto mais sólido e havia menos água na sua parte superior (Figura 41).

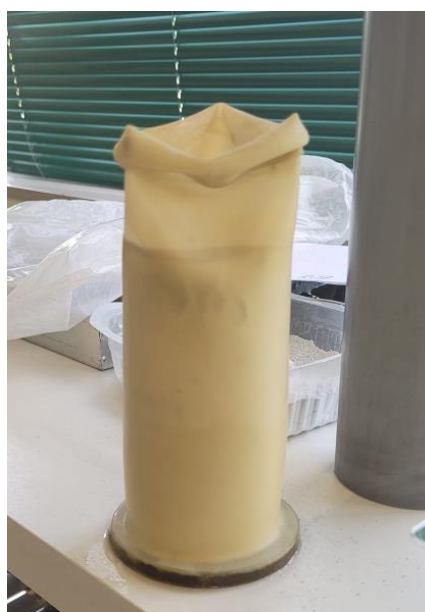


Figura 42 - Provete PROV1 no dia seguinte ao desmolde

Para comparar as tentativas de reconstituição de provetes foi realizado um teste com o auxílio de um penetrómetro com agulha. Para realizar o ensaio o provete (ainda dentro da membrana de látex) foi colocado no equipamento e foi medida a profundidade que a agulha iria penetrar no provete com seu peso próprio. Para este provete o resultado encontrado foi de 7,1 mm. A Figura 43 demonstra este ensaio sendo realizado.

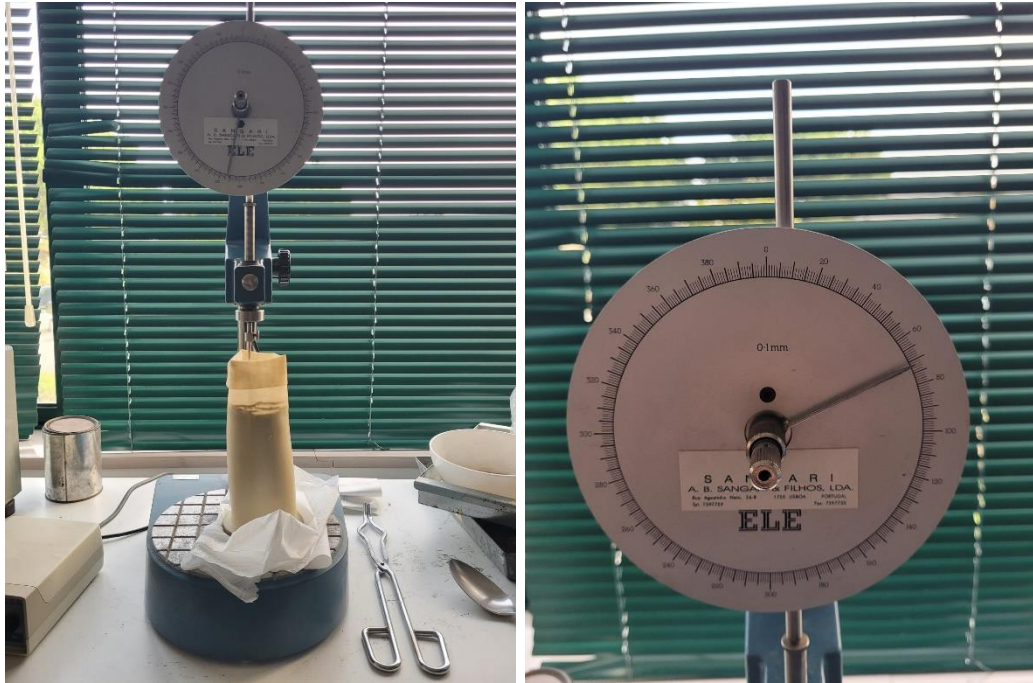


Figura 43 - Ensaio de penetração com agulha no PROV1

Após alguns dias repousado sobre papel absorvente o provete tomou um aspeto sólido. Na Figura 44 é possível analisar seu exterior. Houve a formação de algumas bolhas na superfície e também a presença de vazios na interface provete-pedra porosa.

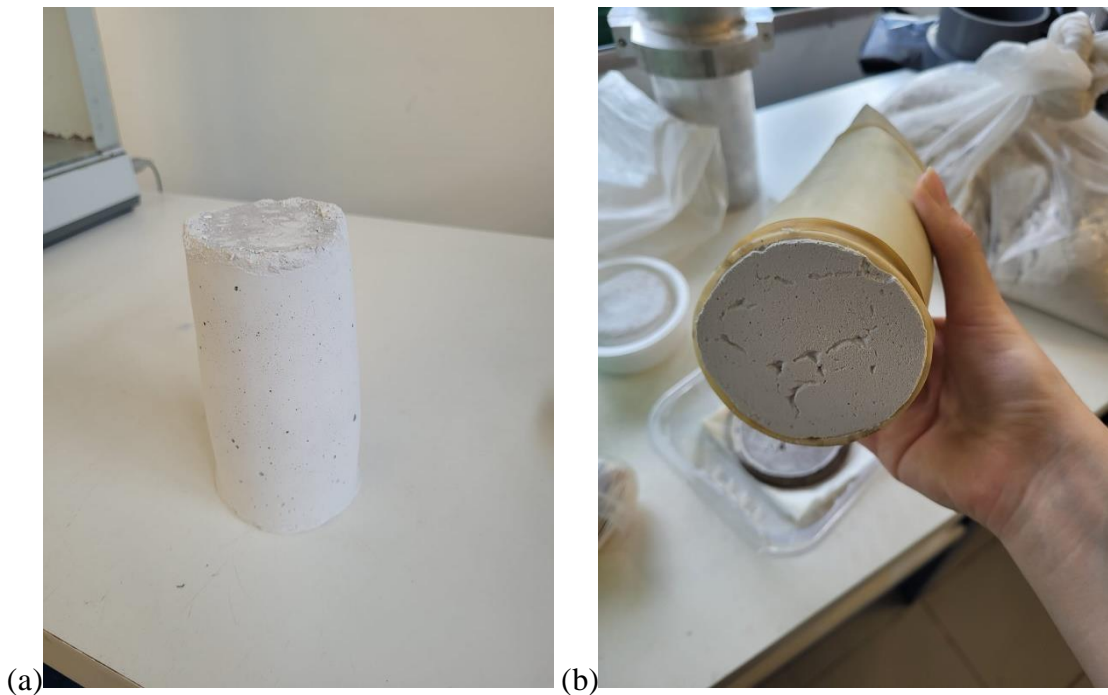


Figura 44 - PROV1 após 14 dias: a) fundo com presença de vazios; b) aspeto externo com presença de bolhas

Na Figura 45 apresenta-se o procedimento para determinação do índice de vazios que foi realizado no provete. Dois cilindros foram cortados do provete, um da base e o outro do topo. Seus diâmetros, espessuras e massas foram determinados.

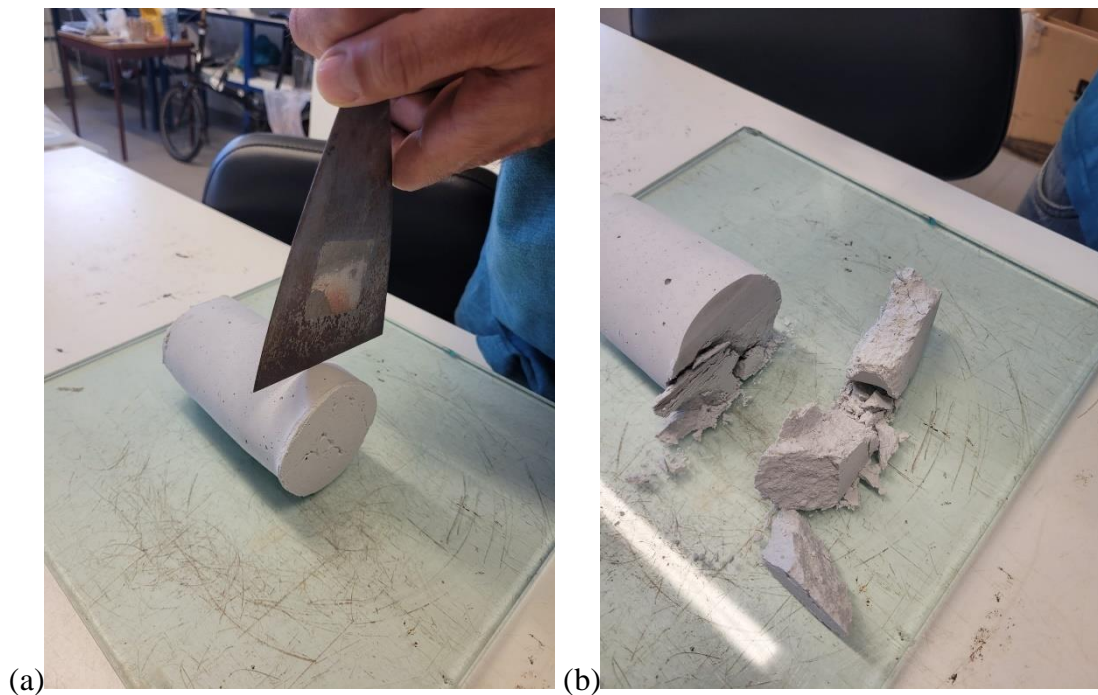


Figura 45 - Corte de cilindro para determinação do índice de vazios: a) espátula utilizada para corte; b) cilindro fraturado após corte

A Equação 4 foi utilizada para obter o índice de vazios. Uma vez que é conhecida a densidade das partículas sólidas do PP1 (2,554) e o peso volúmico da água (1gf/cm^3).

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{(V_t - V_s)}{V_s} \quad (4)$$

onde:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (5)$$

onde:

$$G = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (6)$$

em que:

e = Índice de vazios;

V_v = Volume de vazios (cm^3);

V_t = Volume total (cm^3);

V_s = Volume de partículas sólidas (cm^3);

γ_s = Peso volúmico das partículas sólidas (gf/cm^3);

W_s = Peso das partículas sólidas (gf);

G = Densidade de partículas sólidas;

γ_w = Peso volúmico da água (gf/cm^3).

Na Tabela 8 estão descritos os dados obtidos com o ensaio para determinar o índice de vazios do PROV1. O índice de vazios obtido para o topo do provete foi de 3,559 e para a base do provete foi de 1,320. Esta diferença significativa de valores entre as secções do provete, sendo o índice de vazios da base muito menor que o do topo, pode ser explicada pela necessidade de uma coluna de material sedimentado relativamente alta comparada à altura do provete a ser formado. Assim, a mistura inicial homogênea e a proximidade entre partículas limitam o movimento relativo entre elas durante a sedimentação, fato este mais observado na base da coluna sedimentada, na região de interesse da formação do provete (Carraro & Prezzi, 2008).

Tabela 8 - Dados do teste para determinação do índice de vazios do PROV1

| | Topo do provete | Base do provete |
|--|-----------------|-----------------|
| Espessura (mm) | 25 | 23 |
| Diâmetro (mm) | 63 | 68 |
| Volume cilindro (cm^3) | 77.93 | 83.53 |
| Massa cápsula (g) | 17.240 | 16.970 |
| Massa cápsula + provete seco (g) | 60.876 | 108.868 |
| Massa provete seco (g) | 43.638 | 91.898 |
| Volume de partículas sólidas (cm^3) | 17.0862 | 35.982 |
| Índice de vazios | 3.559 | 1.320 |

Na Tabela 9 é apresentado um resumo desta primeira tentativa: as quantidades de materiais utilizados, as dimensões do provete obtido e os resultados dos testes que foram realizados com o provete.

Tabela 9 - Quantidades de material, dimensões finais e resultados de ensaios do PROV1

| | | |
|---------------------------|------|-----------------|
| Material seco (g) | | 500 |
| Água (g) | | 333 |
| Diâmetro (mm) | | Entre 68 e 71 |
| Altura (mm) | | Entre 128 e 130 |
| Volume (cm ³) | | 489.38 |
| Penetrómetro (mm) | | 7.1 |
| Índice de vazios | Topo | 3.559 |
| | Base | 1.320 |

4.3. Segunda tentativa de reconstituição

Nesta tentativa (PROV2) o material utilizado foi o PP2. Foram utilizadas 900 g do material PP2 e 500 g de água. Para a montagem do conjunto desta vez foi utilizado o tubo de PVC, com 1 m de comprimento, para que o maior gradiente hidráulico entre o topo e a base do provete pudesse ajudar a obter provetes mais consistentes, tal como se pode observar na Figura 46.



Figura 46 - Tubo de PVC utilizado

Pela maior quantidade de finos presente no material optou-se por utilizar o papel filtro sobre a pedra porosa, para prevenir que o material viesse a entupir os poros da pedra. Inicialmente o material foi despejado cuidadosamente no molde, com a membrana e, pedra porosa e filtro. Em seguida, o tubo de PVC foi encaixado sobre o

molde e a membrana desdobrada sobre o tubo e presa com *o-ring* (Figura 47a). Por este tubo ser mais alto e não estar conectado ao molde ele foi preso à uma bancada do laboratório para ajudar na sua estabilidade (Figura 47b). O resto do material foi despejado dentro do tubo com o auxílio de um funil, para que o material escorresse pela lateral do tubo. Após este passo o tubo foi preenchido por água.

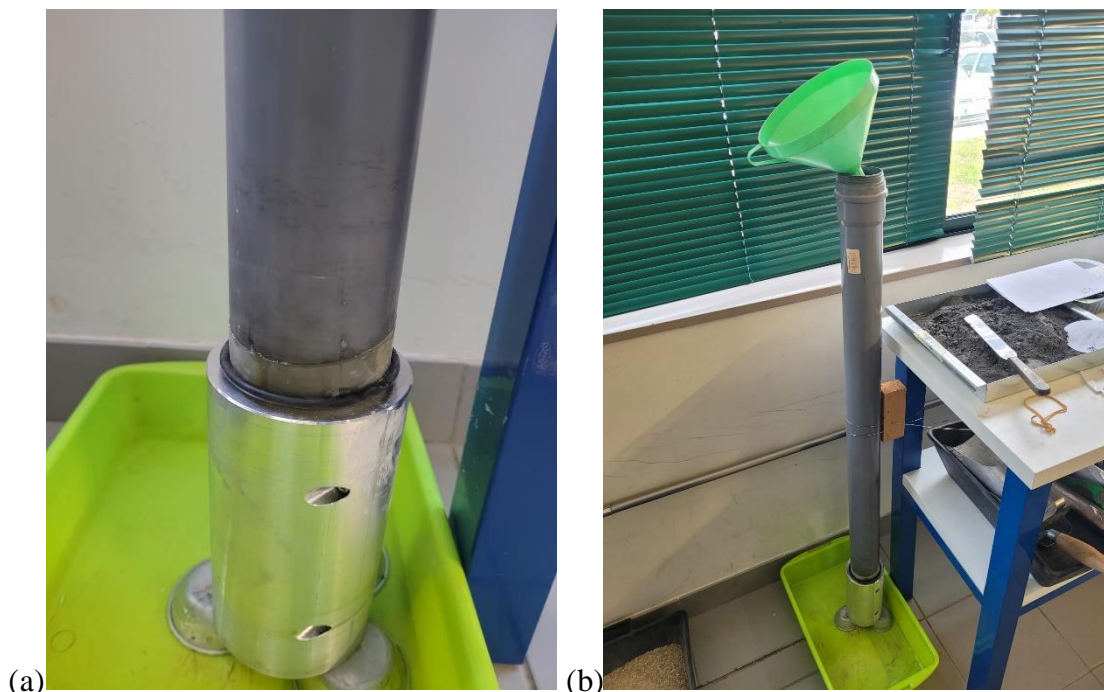


Figura 47 - Montagem do conjunto para sedimentação do PROV2: a) pormenor da ligação molde-tubo; b) conjunto completo e funil

O provete permaneceu 10 dias sedimentando. Neste tempo, parte da água que foi adicionada escoou, no dia da desmoldagem havia metade da altura inicial da coluna de água sobre o provete. Antes da desmoldagem foi removida a água, com o auxílio de uma mangueira (Figura 48).



Figura 48 - Retirada do excesso de água com mangueira

O *o-ring* que estava segurando a membrana foi rolado para cima do tubo de PVC (Figura 49a). Ao dobrar a membrana sobre o molde bipartido e retirar o tubo de PVC notou-se que havia muita água junto à mistura (Figura 49b). O aspeto do provete após a remoção do tubo de PVC está representado na Figura 49c.



Figura 49 – Retirada do tubo de PVC

O provete estava com um aspeto muito mole quando foi desmontado o conjunto. O provete, ainda dentro do molde bipartido ficou repousando sobre papel absorvente para auxiliar na remoção da água em excesso (Figura 50).



Figura 50 – Uso de papel absorvente para remoção da água em excesso no provete

O provete repousou sobre papel absorvente por um dia. Após passado este tempo foi notado que sua superfície estava seca e aparentava ter um aspeto mais sólido quando comparado ao dia anterior. Procedeu-se ao desmolde do provete (Figura 51). Segundos após o desmolde, o provete, que estava muito mole, perdeu seu formato original, por falta de resistência. Sendo assim não foi possível obter as medidas de diâmetro e altura do provete.



Figura 51 - Provete PROV2 desmoldado

Foi realizado também o teste com o auxílio de um penetrômetro com agulha. Para realizar o ensaio, o provete, ainda dentro da membrana de látex, foi colocado no equipamento. Foi medida a profundidade que a agulha iria penetrar no provete com seu peso próprio. No caso deste provete a sua consistência era muito mole, portanto a agulha penetrou completamente no provete. A Figura 52 demonstra este ensaio sendo realizado.



Figura 52 - Ensaio de penetração com agulha no PROV2

A determinação do índice de vazios quando o provete está saturado é feita segundo a Equação 7. Uma vez que é conhecida a densidade das partículas sólidas do PP2 (2,672).

$$G * w = S * e \quad (7)$$

em que:

G = densidade das partículas sólidas

w = teor em água

S = grau de saturação (100%)

e = índice de vazios

Foram retiradas 3 amostras: na secção de baixo, onde o provete estava um pouco firme; uma 1,5 cm acima da primeira, não estava firme; e a última amostra, da porção superior, a qual era a menos firme entre elas. Os índices de vazios obtidos estão representados na Tabela 10.

Tabela 10 - Dados do teste para determinação do índice de vazios do PROV2

| | Base | 15 mm acima da base | Topo |
|------------------------------------|--------|---------------------|--------|
| Massa cápsula (g) | 10.834 | 16.028 | 10.944 |
| Massa cápsula + provete húmido (g) | 26.098 | 41.405 | 37.279 |
| Massa cápsula + provete seco (g) | 22.975 | 35.774 | 31.462 |
| Teor em água (%) | 25.723 | 28.517 | 28.351 |
| Índice de vazios | 0.687 | 0.762 | 0.758 |

A Tabela 11 apresenta um resumo desta segunda tentativa: as quantidades de materiais utilizados e os resultados dos testes que foram realizados com o provete.

Tabela 11 - Quantidades de material, dimensões finais e resultados de ensaios do PROV2

| | | |
|---------------------------------|---------------------|-------|
| Material seco (pó de pedra) (g) | 900 | |
| Água (g) | 500 | |
| Penetrómetro (mm) | - | |
| Índice de vazios | Base | 0.687 |
| | 15 mm acima da base | 0.762 |
| | Topo | 0.758 |

4.4. Terceira tentativa de reconstituição

Nesta tentativa (PROV3) o material utilizado foi o PP2 novamente. Foram utilizadas 3000 g do material PP2 e 1000 g de água. O processo de mistura e montagem do equipamento foi a mesma da tentativa anterior. Nesta tentativa foi aumentada consideravelmente a quantidade de material utilizado. Este aumento permitiu a existência de uma camada de material sedimentando acima do provete no tubo. Esta camada tinha 33 cm de altura. Na Figura 53 estão apresentadas as fases de mistura do PP2 com a água até a consistência desejada ser obtida.

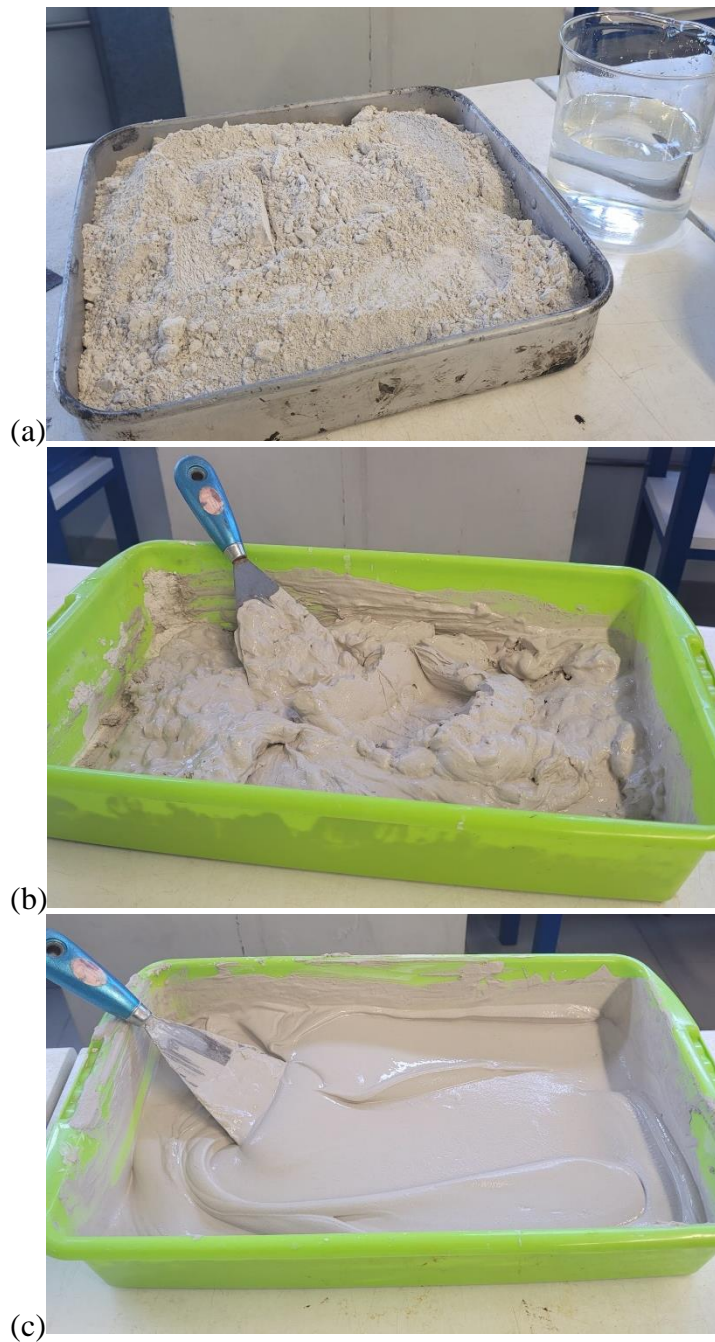


Figura 53 – Fases de mistura do material com água para o PROV3

Os passos da montagem foram feitos como na tentativa anterior. Na Figura 54 é possível observar as etapas da montagem do conjunto. Na Figura 54b fica aparente uma das dificuldades da reconstituição utilizando este conjunto. A membrana foi apenas posicionada dentro do molde bipartido e presa com a ajuda de *o-rings*. Não foi possível utilizar nenhuma ferramenta para remoção do ar presente entre a membrana e molde. Sendo assim o material despejado não ocupou todo o espaço do molde, e os provetes obtidos apresentaram formatos irregulares.

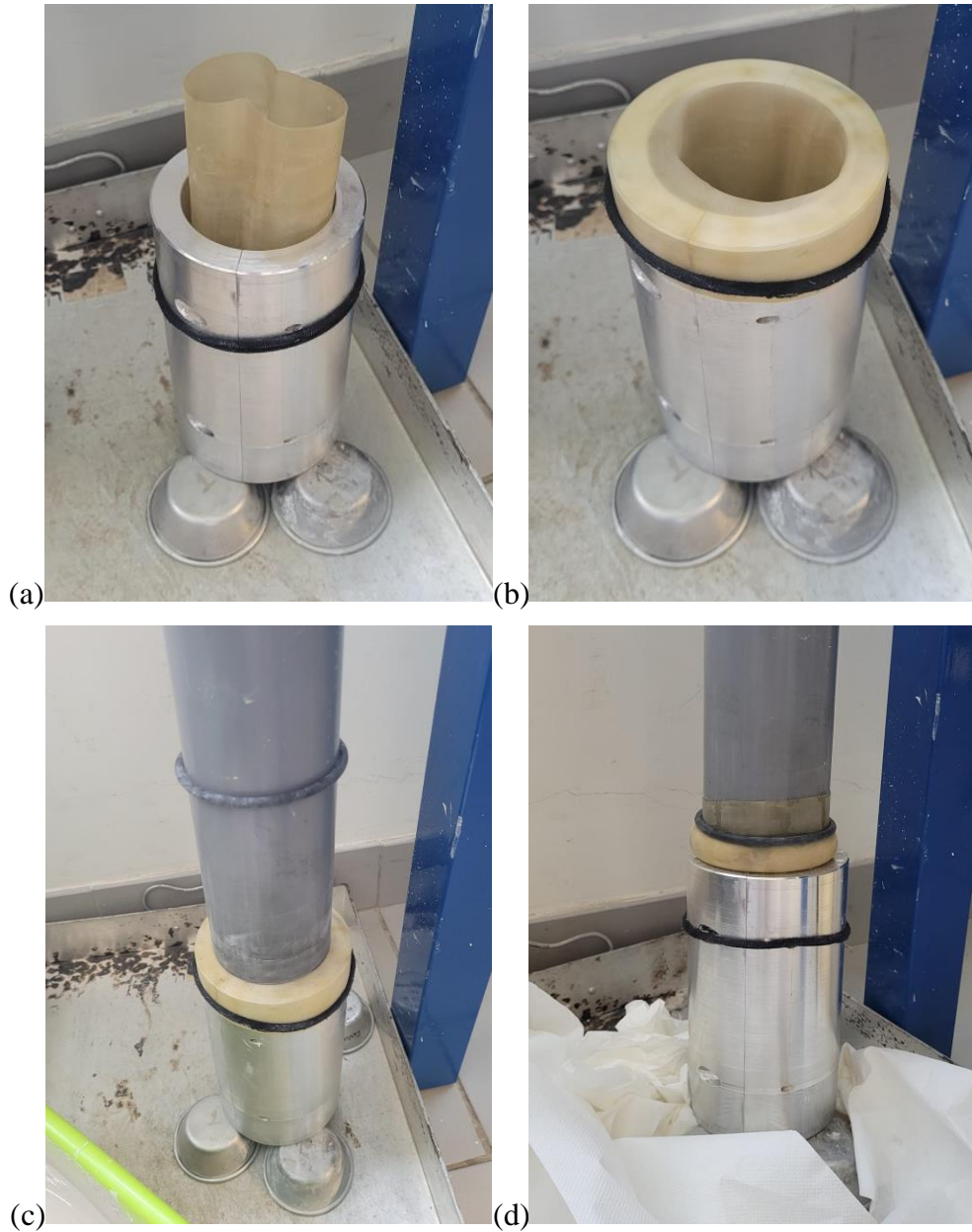


Figura 54 – Etapas da montagem do conjunto do PROV3

Após 6 dias de sedimentação como na tentativa anterior a água presente no tubo foi removida, com o auxílio de mangueira como descrito na segunda tentativa. O Conjunto ficou montado por mais 6 dias. O tubo de PVC foi removido com o auxílio de uma espátula para o provete ficasse com a superfície superior reta (Figura 55).



Figura 55 – Remoção do tubo de PVC do PROV3

Pelo fato de o provete ter permanecido no conjunto de sedimentação por 6 dias sem a presença de água ele apresentou um aspeto mais sólido quando comparado com a tentativa anterior. Porém ainda não estava firme o suficiente para manter seu formato por muito tempo. Após passados alguns minutos o provete começou a perder seu formato original (Figura 56). Foram determinadas as medidas de diâmetro e altura do provete.



Figura 56 – PROV3 desmoldado

Foi realizado também o teste com o auxílio de um penetrómetro com agulha. No caso do PROV3 a sua consistência ainda era muito mole, portanto a agulha penetrou completamente no provete. A Figura 57 demonstra este ensaio sendo realizado.

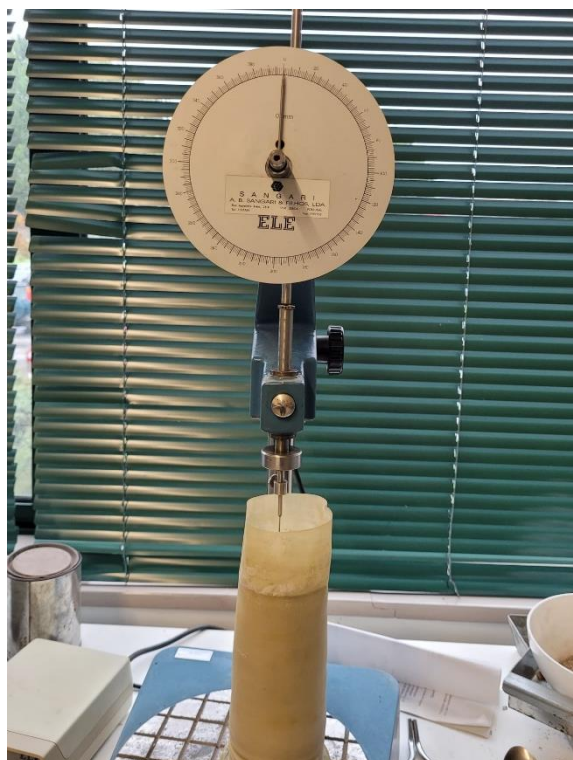


Figura 57 - Ensaio de penetração com agulha no PROV3

A determinação do índice de vazios foi feita segundo a Equação 7. Uma vez que é conhecida a densidade das partículas sólidas do PP2 (2,672). Foram obtidas amostras do topo, meio e base do provete. A Tabela 12 apresenta os resultados do índice de vazios do PROV3.

Tabela 12 - Dados do teste para determinação do índice de vazios do PROV3

| | Base | Meio | Topo |
|------------------------------------|---------|---------|---------|
| Massa cápsula (g) | 10.841 | 10.803 | 10.841 |
| Massa cápsula + provete húmido (g) | 33.673 | 38.194 | 47.031 |
| Massa cápsula + provete seco (g) | 29.7761 | 33.0997 | 40.3735 |
| Teor em água (%) | 20.580 | 22.848 | 22.543 |
| Índice de vazios | 0.550 | 0.610 | 0.602 |

A Tabela 13 apresenta um resumo desta terceira tentativa: as quantidades de materiais utilizados, as dimensões do provete obtido e os resultados dos testes que foram realizados com o provete.

Tabela 13 - Quantidades de materiais, dimensões finais e resultados de ensaios do PROV3

| | | |
|-----------------------------------|-----------------|-------|
| Material seco (pó de pedra) (g) | 3000 | |
| Água (g) | 1000 | |
| Diâmetro (mm) | Entre 65 e 71.8 | |
| Altura (mm) | Entre 144 e 152 | |
| Volume - média (cm ³) | 545.39 | |
| Penetrômetro (mm) | - | |
| Índice de vazios | Base | 0.550 |
| | Meio | 0.610 |
| | Topo | 0.602 |

4.5. Quarta tentativa de reconstituição

Este provete foi montado seguindo os passos descritos na segunda tentativa. Foram utilizadas 3000 g do material PP2 e 1000 g de água. O conjunto ficou montado por 6 dias com água no tubo de PVC e 6 dias sem água. A Figura 58 apresenta o momento da retirada do tubo de PVC com o auxílio de uma espátula.



Figura 58 - Remoção do tubo de PVC do PROV4

O provete após a remoção do tubo de PVC está apresentado na Figura 59. Seu aspecto era muito similar ao do PROV3.



Figura 59 – Provete PROV4 dentro do molde bipartido

Na Figura 60 está representado o provete após o seu desmolde. Na Figura 60b ficou aparente a dificuldade comentada na tentativa anterior, em que a membrana não se gruda ao molde e o provete não ocupa toda a área. O provete possui o formato irregular.

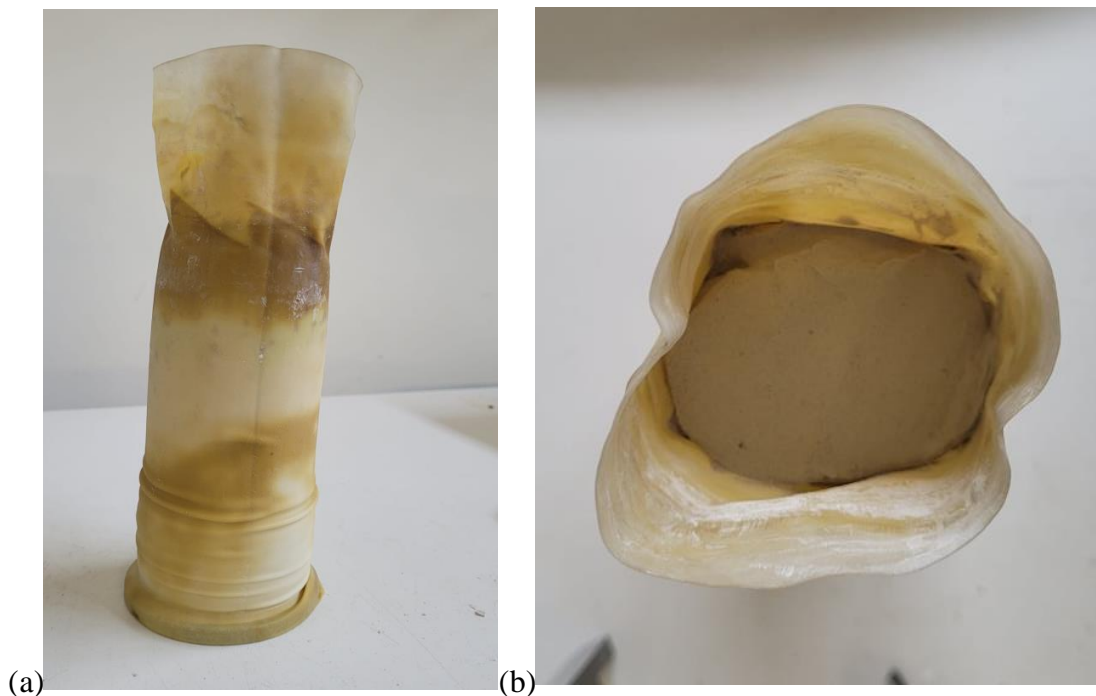


Figura 60 – Provete PROV4 desmoldado

A determinação do índice de vazios foi feita segundo a Equação 7. Uma vez que é conhecida a densidade das partículas sólidas do PP2 (2,672). Foram obtidas amostras

do topo e base do provete. A Tabela 14 apresenta os resultados do índice de vazios do PROV4.

Tabela 14 - Dados do teste para determinação do índice de vazios do PROV4

| | Topo | Base |
|------------------------------------|--------|--------|
| Massa cápsula (g) | 16.039 | 10.854 |
| Massa cápsula + provete húmido (g) | 71.745 | 38.836 |
| Massa cápsula + provete seco (g) | 62.102 | 34.836 |
| Teor em água (%) | 20.935 | 16.679 |
| Índice de vazios | 0.559 | 0.446 |

Foi realizado também o teste com o auxílio de um penetrómetro com agulha. No caso do PROV4 a sua consistência ainda era muito mole. A agulha penetrou completamente no provete. A Tabela 15 apresenta um resumo desta quarta tentativa: as quantidades de materiais utilizados, as dimensões do provete obtido e os resultados dos testes que foram realizados com o provete.

Tabela 15 - Quantidades de materiais, dimensões finais e resultados de ensaios do PROV4

| | | |
|-----------------------------------|-------------------|-------|
| Material seco (pó de pedra) (g) | 3000 | |
| Água (g) | 1000 | |
| Diâmetro (mm) | Entre 67.0 e 73.5 | |
| Altura (mm) | Entre 149 e 151 | |
| Volume - média (cm ³) | 581.10 | |
| Penetrómetro (mm) | - | |
| Índice de vazios | Base | 0.446 |
| | Topo | 0.559 |

4.6. Quinta tentativa de reconstituição

Na quinta tentativa de reconstituição o material utilizado foi o RJ1. O material estava armazenado com água. A mistura para a preparação do provete foi obtida adicionando mais água ao material até a consistência desejada ter sido atingida (Figura 61). Foi determinado o teor em água da mistura, este valor obtido foi de 38,20%. O processo de montagem do conjunto foi feito de acordo com o descrito na segunda tentativa.



Figura 61 – Mistura utilizada para a reconstituição do provete PROV5

O provete após a remoção do tubo de PVC está apresentado na Figura 62. Seu aspeto era muito similar ao do PROV4.

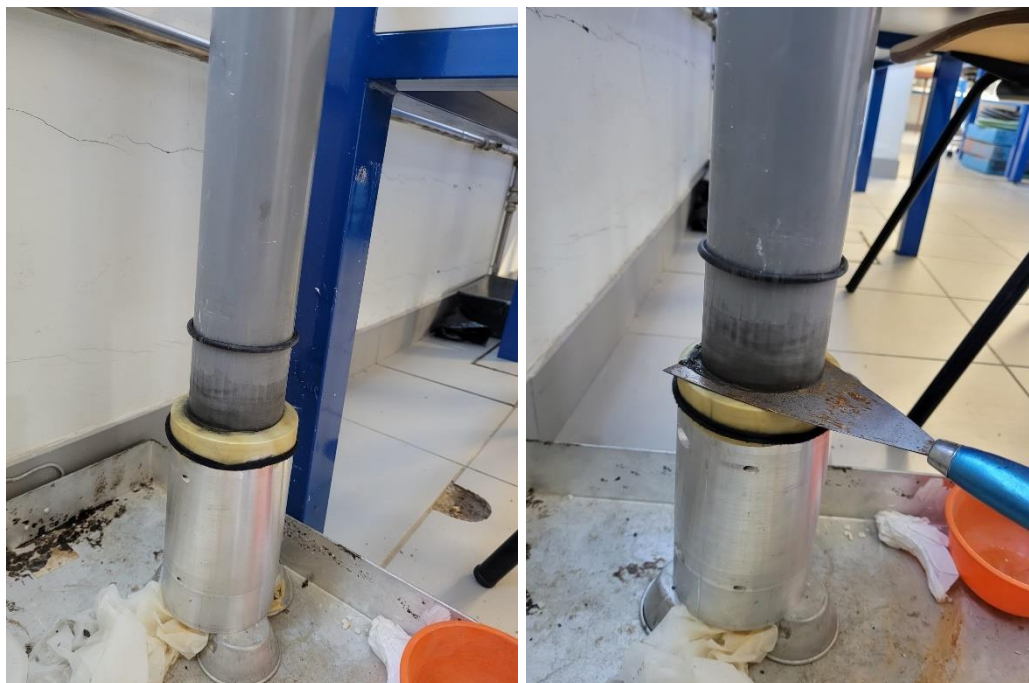


Figura 62 - Remoção do tubo de PVC do PROV5

O provete após a remoção do tubo de PVC está apresentado na Figura 63.



Figura 63 - Provede PROV5 dentro do molde bipartido

Na Figura 64 está representado o provede após o seu desmolde. Este provede apresentou um aspeto mais firme e estável que os anteriores. Seu diâmetro permaneceu uniforme em toda sua altura. Foi realizado também o teste com o auxílio de um penetrómetro com agulha. A agulha penetrou completamente no provede.



Figura 64 - Provede PROV5 desmoldado

A determinação do índice de vazios foi feita segundo a Equação 7. Uma vez que é conhecida a densidade das partículas sólidas do RJ1 (4,104). Foram obtidas amostras do topo e base do provete. A Tabela 16 apresenta os resultados do índice de vazios do PROV5.

Tabela 16 - Dados do teste para determinação do índice de vazios do PROV5

| | Topo | Meio | Base |
|------------------------------------|---------|---------|---------|
| Massa cápsula (g) | 16.0461 | 10.8537 | 11.1257 |
| Massa cápsula + provete húmido (g) | 50.3352 | 60.0407 | 35.6898 |
| Massa cápsula + provete seco (g) | 42.2895 | 47.8144 | 30.3286 |
| Teor em água (%) | 30.658 | 33.0792 | 27.9187 |
| Índice de vazios | 1.2582 | 1,3576 | 1,1458 |

A Tabela 17 apresenta um resumo desta quinta tentativa: as quantidades de materiais utilizados, as dimensões do provete obtido e os resultados dos testes que foram realizados com o provete.

Tabela 17 - Quantidades de materiais, dimensões finais e resultados de ensaios do PROV5

| | | |
|---------------------------|-----------------|--------|
| Teor em água (%) | 38.20 | |
| Diâmetro (mm) | Entre 62 e 71.5 | |
| Altura (mm) | Entre 150 e 152 | |
| Volume (cm ³) | 528.93 | |
| Penetrómetro (mm) | - | |
| Índice de vazios | Topo | 1.2582 |
| | Meio | 1.3576 |
| | Base | 1.1458 |

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Na presente dissertação, o primeiro objetivo foi obter as propriedades básicas dos três materiais estudados e, para tal, ensaios laboratoriais foram executados a fim de determinar a granulometria dos materiais, recorrendo à peneiração e sedimentação, tal como definido na norma ISO/TS 17892-4:2004 (CEN, 2004b), os limites de Atterberg, com base na norma NP 143 (1969) e as densidades de partículas sólidas, a norma ISO/TS 17892-3:2004 (CEN, 2004a).

Além disso, nesta dissertação, pretendeu-se adaptar as técnicas para a reconstituição de provetes procurando reproduzir o comportamento dos rejeitados nas instalações de deposição. A reconstituição de provetes tem uma especial importância pois permite reproduzir o comportamento dos rejeitados em laboratório. A reprodução do comportamento, permite ensaiar os provetes e avaliar o seu potencial desenvolvimento de riscos que, poderão conduzir as barragens de contenção à rotura. Com o objetivo de desenvolver um equipamento que permitisse a criação de provetes através da sedimentação, foi realizado um estudo sobre várias técnicas já desenvolvidas. Apesar das várias técnicas, destacou-se os métodos de reconstituição de Kuerbis & Vaid (1988), Carraro & Prezzi (2008), Corrêa (2018) e Jorge (2020).

O método desenvolvido não apresentou bons resultados para a reconstituição de provetes. Um dos problemas encontrados foi o fato de que o processo de reconstituição é muito demorado e delicado. Cada tentativa necessitou um tempo de aproximadamente duas semanas para ser realizada. Outro problema analisado foi a qualidade dos provetes obtidos. Todos os provetes reconstituídos perderam a sua estabilidade e seu formato inicial após passado alguns minutos do desmolde. Os provetes utilizados em ensaios triaxiais devem ter a capacidade de suportar seu peso próprio mais o peso do bloco de topo da câmara triaxial, portanto os provetes obtidos neste estudo não se mostram capazes de serem utilizados para a realização de tais ensaios.

De modo a aproximar os resultados obtidos em laboratório e o comportamento dos rejeitados *in situ*, é necessário melhorar as técnicas já desenvolvidas ou desenvolver novas técnicas que permitam validar os resultados alcançados em laboratório. A partir dos resultados obtidos e das observações no decorrer deste trabalho, sugere-se para trabalhos futuros:

- Elaboração de novas técnicas para a reconstituição de provetes que permitam reproduzir a sedimentação nos locais de deposição de rejeitados;
- Estudar a evolução do índice de vazios durante os métodos de reconstituição de provetes de forma a recriar provetes com densidades desejadas e controladas;
- Efetuar ensaios triaxiais sobre amostras reconstituídas por compactação (*moist tamping*) e por sedimentação, para avaliar os efeitos das técnicas de reconstituição;
- Avaliar a influência das propriedades mineralógicas sobre as características dos rejeitos de mineração, com base na origem da rocha bruta;
- Continuar o estudo a partir de outros ensaios complementares.

REFERÊNCIAS

- Abreu, É. (2012). *Estudo das condições de liquefação da areia de coimbra em triaxial estático e cíclico* [Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto]. <http://www.fe.up.pt>
- Abreu, I. C., Oliveira, S., Oliveira Filho, W. L., & Fourie, A. (2016). Slurry Deposition Method for Reconstituted Specimen in Triaxial and Consolidation Tests. *VII Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens - COBRAMSEG*. <https://doi.org/10.20906/cps/gj-01-0024>
- Araujo, C. B. (2006). *Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- ASTM. (2017). *ASTM D2850-03 Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils*.
- ASTM. (2020). *ASTM D4767 – 11: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*.
- Bedin, J. (2010). *Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração* [Tese de doutorado]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Carraro, J. A. H., & Prezzi, M. (2008). *A New Slurry-Based Method of Preparation of Specimens of Sand Containing Fines*. www.astm.org
- Casagrande, A. (1975). Liquefaction and Cyclic Deformation of Sands; A critical Review. *5th American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 79–133.
- CEN. (2004a). *Determination of particle density - Pycnometer method (ISO/TS 17892-3:2004)*, European Committee for Standardization.
- CEN. (2004b). *Determination of particle size distribution (ISO/TS 17892-4:2004)*, European Committee for Standardization.
- Corrêa, M. M. (2018). *Impacto da reconstituição de amostras de laboratório na avaliação do potencial de liquefação em depósitos de rejeito* [Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas]. Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.
- Costa, L. S. P. (2014). *Estudo da consolidação de solos siltosos jovens* [Dissertação de Mestrado]. ESTGV.
- Engels, J. (2006). *An expert management system for surface tailings storage*. University of Leeds.
- Falcucci, A., & Peres, A. E. C. (2010). Abordagem prática para o uso de pastas minerais como forma de disposição de rejeitos. *Acervo Da 6a Edição Do Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto*.
- França, S. C. A., & Trampus, B. C. (2018). Desaguamento de Rejeitos Minerais para Aplicação de Métodos de Disposição Alternativos às Barragens de Rejeito Convencionais. *Série Tecnológica Ambiental*, 102, 59.
- Ishihara, K., Sodekawa, M., & Tanaka, Y. (1978). Effects of Overconsolidation on Liquefaction Characteristics of Sands Containing Fines. In *Dynamic Geotechnical Testing* (pp. 246–264). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP35680S>

REFERÊNCIAS

- Jorge, A. F. C. (2020). *Determinação laboratorial de propriedades geotécnicas de rejeitados mineiros*. Instituto Politécnico de Viseu.
- Khalili, A., & Wijewickreme, D. (2008). New slurry displacement method for reconstitution of highly gap-graded specimens for laboratory element testing. *Geotechnical Testing Journal*, 31(5), 424–432.
- Krizek, R. J. (2004). Slurries in Geotechnical Engineering. In *The 12th Spencer J. Buchanan Lecture*.
- Kubo, K., & Mogami, T. (1953). The Behaviour of Soil during Vibration. *3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Switzerland)*.
- Kuerbis, R., & Vaid, Y. P. (1988). SAND SAMPLE PREPARATION-THE SLURRY DEPOSITION METHOD. *Soils and Foundations*, 28(4), 107–118.
- Matos Fernandes, M. de. (2011). *Mecânica dos Solos. Conceitos e Princípios Fundamentais* (2nd ed.). U. Porto Press.
- Miura, S., & Toki, S. (1982). A Sample Preparation Method and its Effect on Static and Cyclic Deformation-Strength Properties of Sand. *Soils and Foundations*, 22(1), 61–77. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.22.61>
- NP 143. (1969). *Solos – Determinação dos limites de consistência*.
- Oliveira, M. (2011). Desenvolvimento do Projeto de Deposição de Rejeitados Espessados / Pasta de Rejeitados. In *Boletim de Minhas* (Vol. 46, pp. 137–141).
- Pereira, E. L. (2005). *Estudo do Potencial de Liquefação de Rejeitos de Minério de Ferro sob Carregamento Estático* [Dissertação para Mestrado em Engenharia Geotécnica]. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Pinasseau, A., Zerger, B., Roth, J., Canova, M., & Roudier, S. (2018). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste treatment Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)*. <https://doi.org/10.2760/407967>
- Rafael, H. M. A. M., & Romanel, C. (2014). *Potencial de Liquefação Estática no Alçamento de uma Barragem de Rejeito*.
- Ramos, C. (2013). *Modelling Sand Instability within the Framework of Critical State Soil Mechanics* [Dissertação de Mestrado]. FEUP.
- Raposo, N. P. (2016). *Deposição de Rejeitados Espessados. Caracterização Experimental e Modelação Numérica* [Dissertação para grau de Doutor em Engenharia Civil]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ritcey, G. M. (1989). *Tailings management : problems and solutions in the mining industry*. Elsevier. <https://www.worldcat.org/title/20232518>
- Russo, F. M. (2007). *Comportamento de barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico: caracterização laboratorial e simulação numérica do processo construtivo* [PhD Thesis]. Universidade de Brasília.
- Salfate, E. R. (2011). *Predicting Void Ratio for Surface Paste Tailings Deposited in Thin Layers*.
- Smith, E. S. (1972). Tailings disposal – failures and lessons. *1st International Symposium*.

- Soares, L. (2010). Barragem de rejeitos. In *Tratamento de Minérios* (Vol. 5, pp. 831–888). CETEM/MCT.
- Souza, M. L. (2013). *Procesamiento de minerales - Desaguamento*. Universidade de la Republica - Uruguay.
- Sze, H. Y., & Yang, J. (2014). Failure Modes of Sand in Undrained Cyclic Loading: Impact of Sample Preparation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(1), 152–169. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000971](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000971)
- Tessarotto, C. (2015). Empilhamento a seco para rejeitos de processos minerais (dry stacking). *XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, 430–437.
- Vaid, Y., Chaney, R., Demars, K., Sivathayalan, S., & Stedman, D. (1999). Influence of Specimen-Reconstituting Method on the Undrained Response of Sand. *Geotechnical Testing Journal*, 22(3), 187. <https://doi.org/10.1520/GTJ11110J>
- Vaid, Y., & Negussey, D. (1988). Preparation of Reconstituted Sand Specimens. In *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock* (pp. 405–417). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP29090S>
- Vega-Garcia, D., Brito-Parada, P. R., & Cilliers, J. J. (2018). Optimising small hydrocyclone design using 3D printing and CFD simulations. *Chemical Engineering Journal*, 350, 653–659. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.016>
- Vick, S. G. (1990). *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*. BiTech Publishers Ltd.
- Wikimedia Commons. (2012, October 14). *Morenci Mine*.

REFERÊNCIAS

ANEXO A

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

1. RJ1

| Número do picnómetro | | 213 (pc100) | 295 (pc100) | 397 (pc100) |
|---|--|----------------|----------------|----------------|
| m3 | Picnómetro seco (g) | 33.973 | 30.980 | 33.446 |
| m3 | Picnómetro+água destilada (g) | 131.614 | 130.311 | 132.140 |
| m5 | Picnómetro+provete+água destilada (g) | 144.921 | 148.285 | 145.569 |
| A | Peso da cápsula (g) | 26.054 | 23.512 | 25.633 |
| B | Provete seco + cápsula (g) | 43.636 | 47.329 | 43.328 |
| m4=B-A | Provete seco (g) | 17.583 | 23.817 | 17.695 |
| 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 |
| d | Densidade das partículas (g/cm ³) | 4.105 | 4.068 | 4.139 |
| Média das densidades das partículas (g/cm³) | | | 4.104 | |

2. PP1

| Número do picnómetro | | 213 (pc100) | 295 (pc100) | 397 (pc100) |
|--|--|----------------|----------------|----------------|
| m3 | Picnómetro seco (g) | 33.973 | 30.980 | 33.446 |
| m3 | Picnómetro+água destilada (g) | 131.614 | 130.311 | 132.140 |
| m5 | Picnómetro+provete+água destilada (g) | 148.909 | 148.079 | 149.7038 |
| A | Peso da cápsula (g) | 26.054 | 23.512 | 25.633 |
| B | Provete seco + cápsula (g) | 54.214 | 52.772 | 54.560 |
| m4=B-A | Provete seco (g) | 28.160 | 29.260 | 28.927 |
| 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 |
| d | Densidade das partículas sólidas | 2.584 | 2.539 | 2.538 |
| Média das densidades das partículas sólidas | | | 2.554 | |

ANEXO A

3. PP2

| Número do picnómetro | | 213 (pc100) | 295 (pc100) | 397 (pc100) |
|---|--|------------------------|------------------------|------------------------|
| m3 | Picnómetro seco (g) | 33.971 | 30.956 | 33.446 |
| m3 | Picnómetro+água destilada (g) | 131.634 | 130.328 | 132.140 |
| m5 | Picnómetro+provete+água destilada (g) | 144.061 | 143.954 | 143.568 |
| A | Peso da cápsula (g) | 10.797 | 16.043 | 16.139 |
| B | Provete seco + cápsula (g) | 30.565 | 37.885 | 34.394 |
| m4=B-A | Provete seco (g) | 19.769 | 21.842 | 18.255 |
| t | Temperatura do ensaio (°C) | 17.1 | 17.1 | 17.1 |
| K | Razão entre as densidades da água à temperatura de ensaio e a 20°C | 0.9989 | 0.9989 | 0.9989 |
| d | Densidade das partículas (g/cm ³) | 2.690 | 2.655 | 2.671 |
| Média das densidades das partículas (g/cm³) | | | 2.672 | |

ANEXO B

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

1. RJ1

| FRACÇÃO RETIDA NO PENEIRO 2 MM | PENEIROS | | MATERIAL RETIDO | | | MATERIAL QUE PASSA |
|--------------------------------|----------|----------------|--------------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| | Des. | Aberturas (mm) | Massa (g) m_x | % retida $N_x=(m_x/m_i)\times 100$ | % 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 | | | |
| TOTAIS = | | 254,60 | | | | |

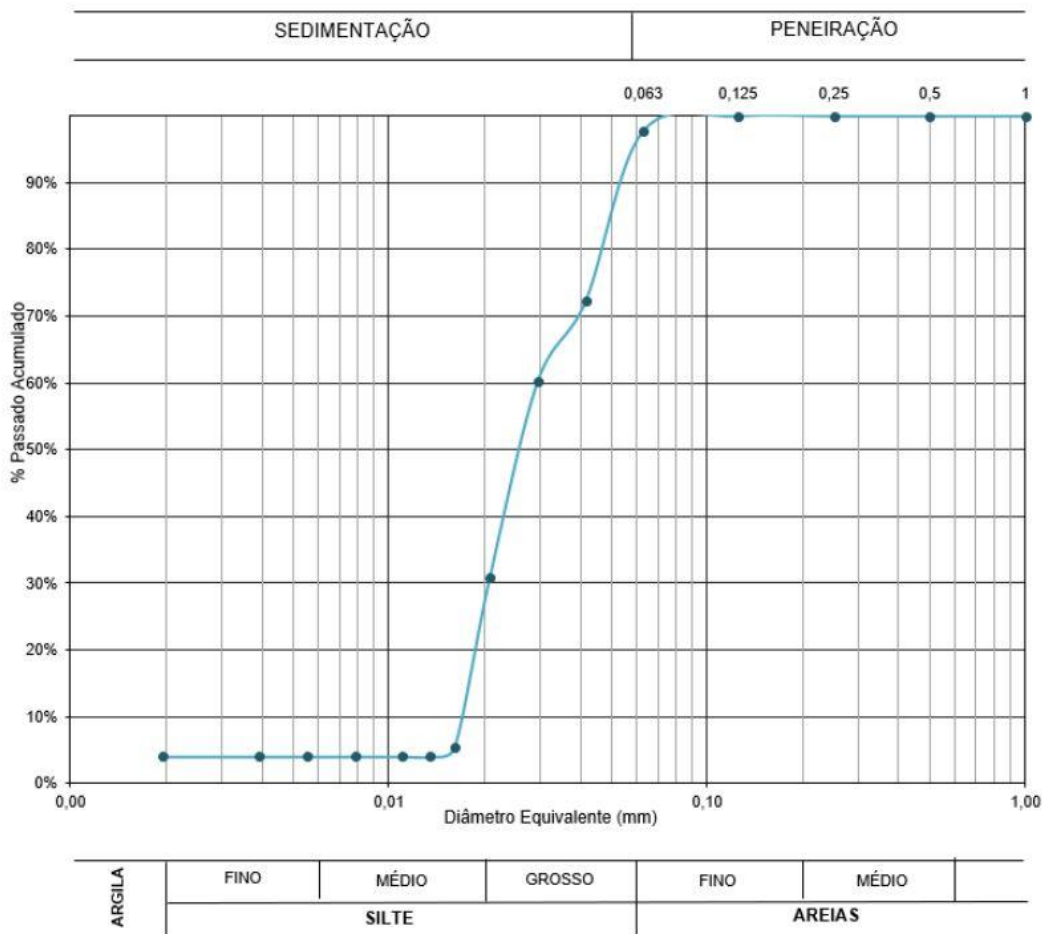
| FRACÇÃO PASSADA NO PENEIRO 2 MM | Massa da amostra a ensaiar (g): | | $m_b =$ | | 254,60 | g |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------|--------------------|---|-----------------------|--|
| | PENEIROS | | MATERIAL RETIDO | | | MATERIAL QUE PASSA |
| | Des. | 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 | | |
| | TOTAIS = | | 254,00 | | | |

| | |
|-------------|--------|
| 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 |

ANEXO B

| 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. PP1

| 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 | | | | |

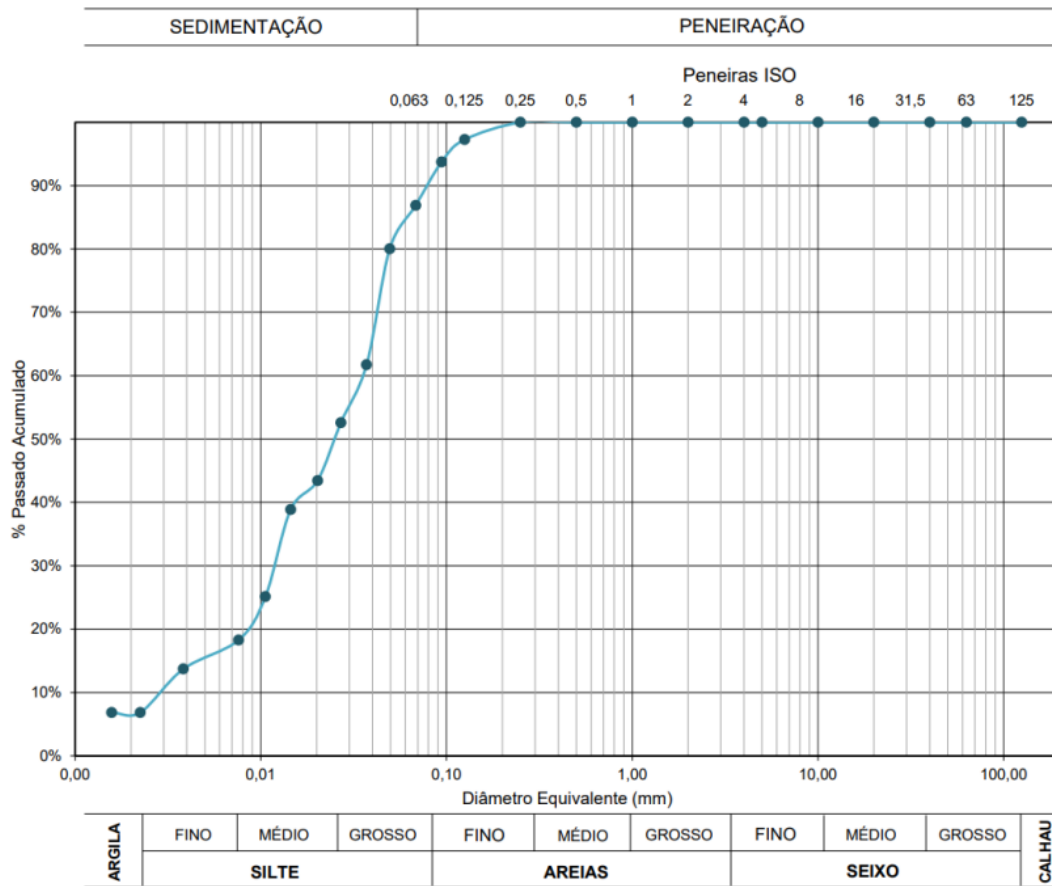
| FRACÇÃO PASSADA NO PENEIRO 2 MM | Massa da amostra a ensaiar (g): | | $m_b = 153,30$ g | | | |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------|--------------------|--|-----------------------|--|
| | PENEIROS | | MATERIAL RETIDO | | | MATERIAL QUE PASSA |
| | Des. | 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 | | | |

| | |
|-------------|--------|
| 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 |

ANEXO B

| 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 | | 1,0009 | 19,00 | 62,6 | 0,973 | 122,37 | 48,42 |
| 2 | | 11:12 | | 0,0002 | 1,0190 | | 1,0009 | 17,50 | 57,7 | 0,973 | 128,43 | 35,08 |
| 4 | | 11:14 | | 0,0002 | 1,0150 | | 1,0009 | 13,50 | 44,5 | 0,973 | 144,61 | 26,32 |
| 8 | | 11:18 | | 0,0002 | 1,0130 | | 1,0009 | 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. PP2

| 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 | | 205.10 | 100.00 | | | |
| TOTAIS = | | 205.10 | | | | |

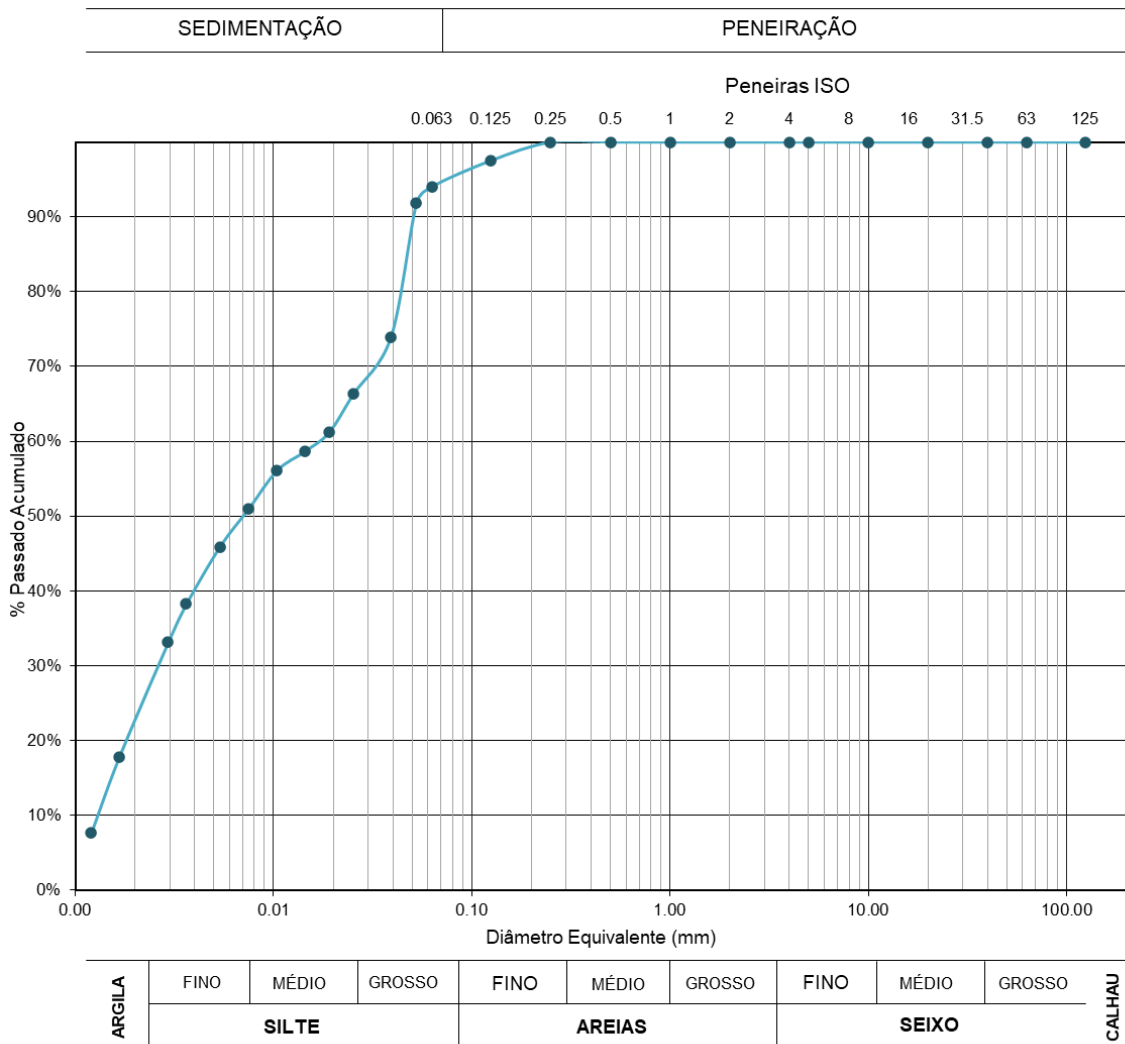
| FRACÇÃO PASSADA NO PENEIRO 2 MM | Massa da amostra a ensaiar (g): $m_b = 205.10$ g | | | | | |
|---------------------------------|--|----------------|--------------------|--|-----------------------|---|
| | PENEIROS | | MATERIAL RETIDO | | | MATERIAL QUE PASSA |
| | Des. | Aberturas (mm) | Massa (g) 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 | 5.04 | 2.5 | 97.5 | 97.5 |
| | 63 μ m | 0.063 | 7.14 | 3.5 | 94.1 | 94.1 |
| | < 63 μ m | | 192.92 | 94.1 | | |
| | TOTAIS = | | 205.10 | | | |

| | |
|-------------|--------|
| Proveta: | Simax |
| Densímetro: | Preto |
| R0 ref | 1.0015 |
| C_M | 0.0004 |

| | |
|-----------------------------|---------|
| G | 2.672 |
| massa do provete, m_w (g) | 31.7 |
| teor em água, w | 1.18% |
| massa seca, m (g) | 31.3303 |

ANEXO B

| t (min) | t (horas) | hh:mm | Temp (°C) | Leituras do densímetro R'_h | Leituras na solução de referência R'_0 |
|---------|-----------|---------------------|-----------|-------------------------------|--|
| 0.5 | | | | | |
| 1 | | 9:56 | 15.10 | 1.01800 | 1.0000 |
| 2 | | 9:57 | | 1.01450 | |
| 4 | | 10:00 | | 1.01300 | |
| 8 | | 10:04 | | 1.01200 | |
| 15 | | 10:11 | 15.10 | 1.01150 | 1.0000 |
| 30 | | 10:26 | 15.10 | 1.01100 | 1.0000 |
| 60 | 1 | 10:56 | 15.20 | 1.01000 | 1.0000 |
| 120 | 2 | 11:56 | 15.60 | 1.00900 | 1.0000 |
| 240 | 4 | 14:28 | 15.60 | 1.00750 | 1.0000 |
| 420 | 7 | 16:55 | 16.00 | 1.00650 | 1.0000 |
| 1440 | 24 | 9:55 ⁺¹ | 14.90 | 1.00350 | 1.0000 |
| 2880 | 48 | 10:00 ⁺² | 14.90 | 1.00150 | 1.0000 |



ANEXO C

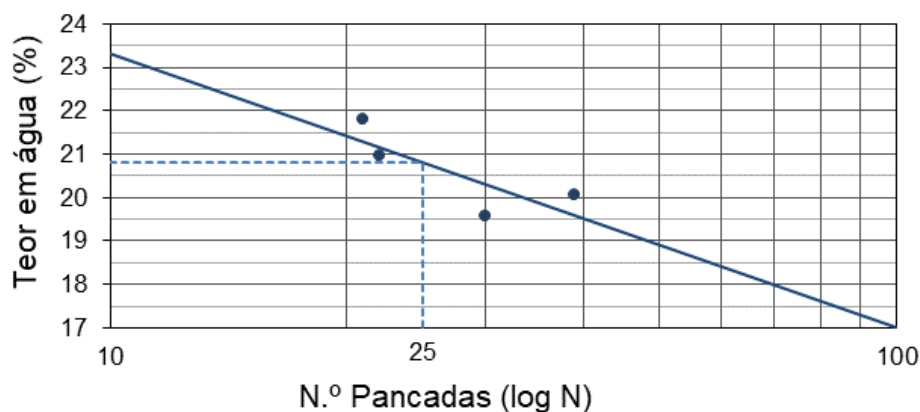
LIMITES DE ATTERBERG SEGUNDO A NORMA PORTUGUESA NP-143:1969

RJ1

Limite de Liquidez

| 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 húmido | 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 | 8.377 | 6.008 | 7.724 | 7.547 |
| W _w =m ₂ -m ₃ | Massa da água | g | 1.826 | 1.205 | 1.620 | 1.476 |
| w=(W _w /W _s) x100 | Teor em água | % | 21.802 | 20.055 | 20.968 | 19.557 |
| N - NÚMERO DE PANCADAS | | | 21 | 39 | 22 | 30 |

Limite de Liquidez

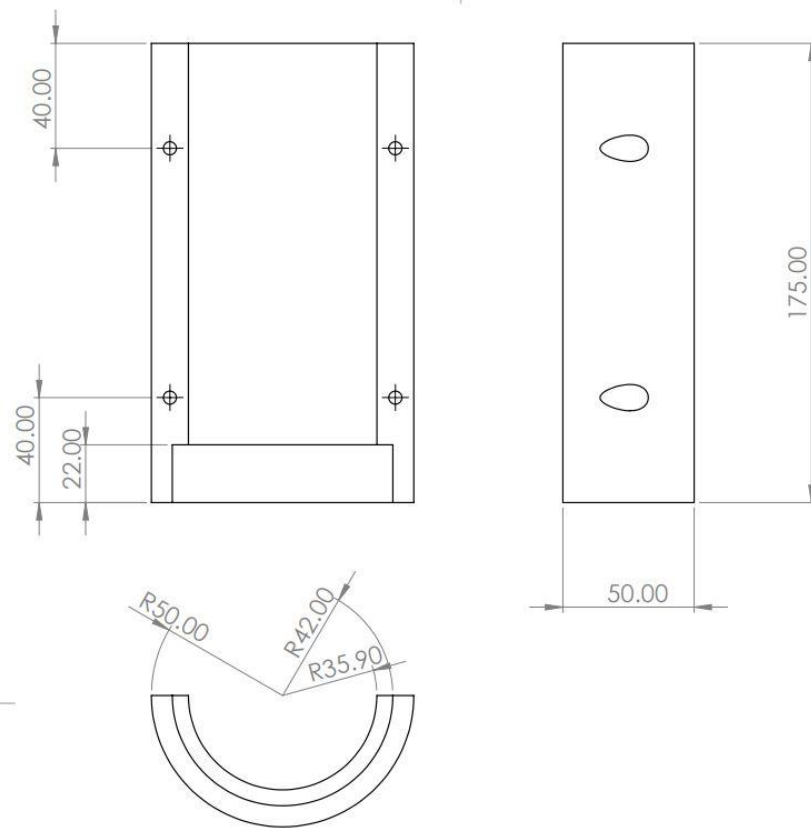


Limite de Plasticidade

| 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 húmido | 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) x100 | Teor em água | % | 20.784 | 21.054 | 20.612 | 20.469 |
| MÉDIA DOS TEORES EM ÁGUA | | | (%) | | 20.73 | |

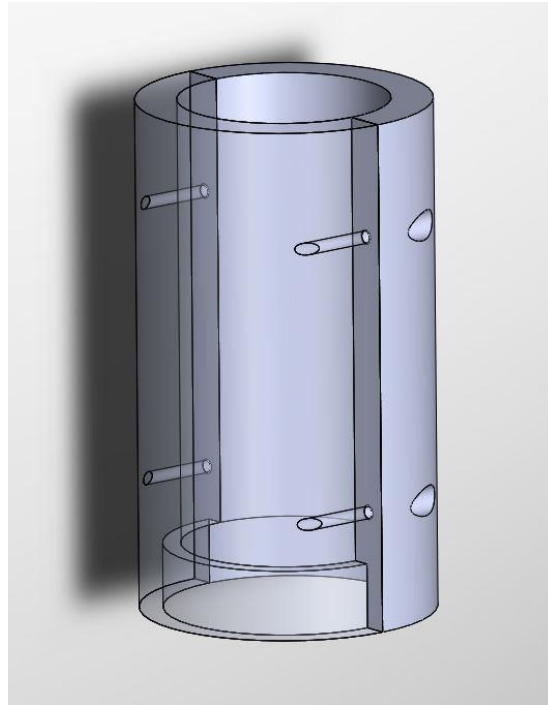
ANEXO D

Molde Bipartido

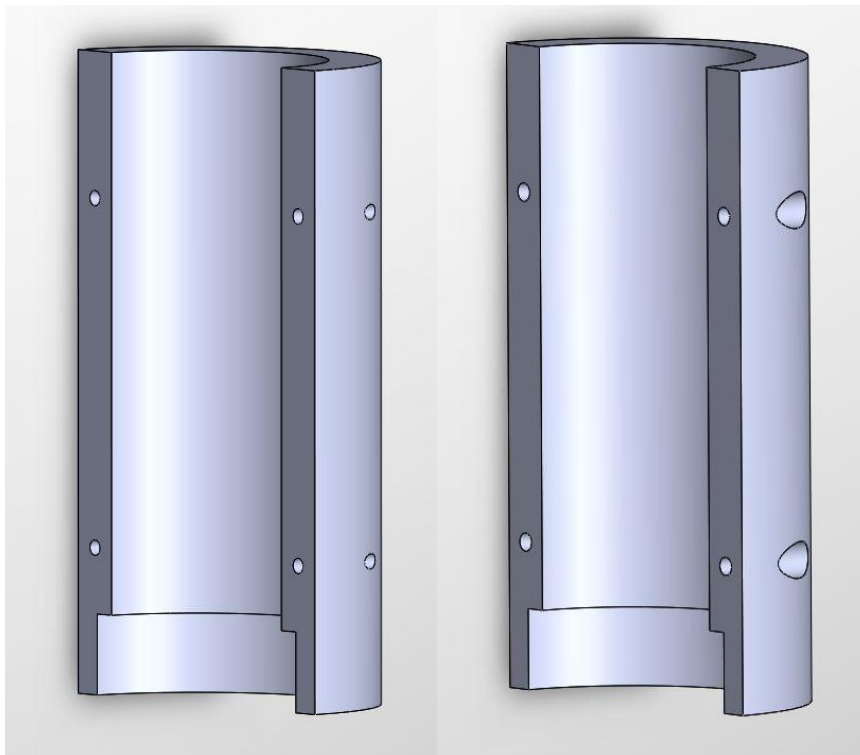


Desenho do molde desenvolvido no software SolidWorks

ANEXO D



Vista 3D dos dois lados do molde unidos, com pormenor do encaixe



Vista 3D dos dois lados do molde separadamente