

André Filipe Costa Jorge

Determinação laboratorial de propriedades geotécnicas de rejeitados mineiros



André Filipe Costa Jorge

Determinação laboratorial de propriedades geotécnicas de rejeitados mineiros

Tese de Mestrado

Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação

Professor Doutor Nuno Pereira Raposo



RESUMO

Na presente dissertação, com o objetivo de caracterizar o comportamento dos rejeitados mineiros, foram realizados diversos ensaios laboratoriais sob amostras remoldadas. Durante os ensaios de caracterização, foram comparadas diferentes técnicas para determinação da densidade das partículas sólidas, tentando perceber as respectivas vantagens e a sua aplicabilidade aos rejeitados. Para além da caracterização, realizou-se um estudo sobre a reconstituição de provetes de rejeitados através de várias técnicas desenvolvidas por outros autores, sujeitos posteriormente a ensaios triaxiais. Ademais, foi desenvolvida uma nova técnica com o objetivo de criar um provete capaz de reproduzir as características dos rejeitados nos locais de deposição. Por fim, foi analisada a forma como se poderá determinar a permeabilidade dos rejeitados durante a realização de ensaios triaxiais.

ABSTRACT

In this dissertation, several laboratory tests using remoulded samples were executed, with the purpose of characterizing the tailings behaviour. Two different procedures for determining the density of solid particles techniques were compared, trying to understand their advantages and applicability to the tailings. Besides the characterization, this work includes a study about the existing techniques for reconstitution of samples for triaxial testing. Furthermore, a new technique was developed, with the purpose of creating samples capable of reproducing the tailings characteristics in the deposition sites. Additionally, the possibilities of determining the tailings permeability during the execution of triaxial tests were analysed.

PALAVRAS CHAVE

Rejeitados

Densidade das partículas sólidas

Permeabilidade

Reconstituição de amostras

Ensaio Triaxial

KEY WORDS

Tailings

Solid particles density

Permeability

Reconstitution of samples

Triaxial test

AGRADECIMENTOS

A concretização da presente dissertação de mestrado consiste na união entre o esforço pessoal e todos aqueles que me acompanharam e apoiaram ao longo da elaboração deste trabalho.

Em primeiro lugar, não posso deixar de agradecer ao Professor Doutor Nuno Raposo, orientador desta dissertação, pela amizade e disponibilidade demonstradas.

Desejo igualmente agradecer à minha família que sempre me estimulou e apoiou no decorrer deste percurso académico, pelo amor que sempre me deu, pelo sentido de força, coragem e superação nas dificuldades deste longo percurso.

A todos os meus sinceros amigos, mas principalmente à Diana Leite e à Mélanie Rodrigues, agradecer pelo apoio e companheirismo durante esta aventura.

Estendo os meus agradecimentos a todos os colegas e professores do Departamento de Engenharia Civil que, de alguma forma, me apoiaram durante a execução desta dissertação.

Por fim, gostaria de agradecer a todos quantos, direta ou indiretamente, com a sua ajuda e boa vontade, tornaram possível a realização deste trabalho.

A todos vós, o meu sincero muito obrigado!

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE QUADROS	XVII
ABREVIATURAS E SIGLAS	XIX
NOTAÇÃO.....	XXI
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento geral	1
1.2. Objetivos da dissertação	2
1.3. Organização e estrutura do texto	2
2. Estado da arte	5
2.1. Produção de rejeitados	5
2.2. Formas de deposição dos rejeitados.....	8
2.3. Armazenamento de rejeitados.....	11
2.3.1. Método de Montante.....	13
2.3.2. Método de Jusante	14
2.3.3. Método de Construção Central.....	15
2.4. Operação e Controlo das barragens de contenção dos rejeitados	16
2.4.1. Principais causas dos acidentes em barragens de rejeitados.....	17
2.4.2. Referência histórica de alguns acidentes em estruturas de deposição de rejeitados.....	18
3. Propriedades básicas dos rejeitados	21
3.1. Introdução	21
3.2. Caracterização do material em estudo	22
3.3. Análise Granulométrica	25
3.3.1. Introdução.....	25
3.3.2. Peneiração.....	25
3.3.3. Ensaio de Sedimentação	27
3.3.4. Resultados e Análise.....	30
3.4. Determinação dos limites de Atterberg	30
3.4.1. Introdução.....	30
3.4.2. Determinação do limite de Liquidez	31
3.4.3. Determinação do limite de Plasticidade	32
3.4.4. Resultados e Análise.....	32

3.5.	Classificação dos solos de acordo com a Classificação Unificada.....	34
3.6.	Densidade das partículas sólidas.....	35
3.6.1.	Introdução.....	35
3.6.2.	Determinação da densidade das partículas de acordo com a NP-83: 1965.....	36
3.6.3.	Determinação da densidade das partículas de acordo com a norma ASTM D5550-06 (ASTM, 2006).....	39
3.6.4.	Vantagens e desvantagens dos métodos utilizados	42
3.6.5.	Resultados obtidos e Análise.....	42
4.	Preparação de provetes para o ensaio triaxial	45
4.1.	Introdução	45
4.2.	Técnicas utilizadas para a preparação de provetes	46
4.2.1.	Introdução.....	46
4.2.2.	Montagem de provetes utilizando a técnica de compactação.....	46
4.2.3.	Montagem de provetes utilizando outras técnicas para a sua preparação	51
4.3.	Técnica desenvolvida para a reconstituição de provetes por sedimentação	57
5.	Determinação da permeabilidade no ensaio triaxial	65
5.1.	Introdução	65
5.2.	Descrição geral do equipamento triaxial	66
5.3.	Execução do ensaio triaxial	67
5.4.	Permeabilidade.....	69
5.4.1.	Introdução.....	69
5.4.2.	Determinação da permeabilidade durante a realização de ensaios triaxiais	76
5.4.3.	Avaliação do efeito das pedras porosas.....	80
5.4.4.	Resultados obtidos.....	84
6.	Conclusões e desenvolvimentos futuros	91
6.1.	Considerações finais	91
6.2.	Desenvolvimentos futuros	92
	Referências	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Esquema geral dos processos de exploração de minério bruto (adaptado de Russo, 2007)	6
Figura 2-2: Evolução da quantidade de partículas sólidas durante o processo de espessamento (Costa, 2014)	8
Figura 2-3: Deposição subaérea de rejeitados (Coqueia, 2014)	9
Figura 2-4: Deposição subaquática de rejeitados (Engels, 2006).....	10
Figura 2-5: Deposições típicas de rejeitados espessados e/ou em pasta (Robinsky, 2002): a) descarga a partir de um ponto central; b)descarga em locais com declive	11
Figura 2-6: Barragem convencional em aterro compactado (adaptado de EPA, 1994).....	12
Figura 2-7: Método de montante de construção de barragens de rejeitados (adaptado de State of Victoria, 2006).....	14
Figura 2-8: Método de jusante de construção de barragens de rejeitados (adaptado de State of Victoria, 2006)	15
Figura 2-9: Método de construção central de barragens de rejeitados (adaptado de State of Victoria, 2006).....	15
Figura 2-10: Causas dos acidentes ocorridos em barragens de rejeitados em dois períodos diferentes de tempo (adaptado de Azam & Li, 2010).....	17
Figura 2-11: Rutura da barragem de Samarco retirada de (https://brasil.mongabay.com/2018/03/rompimento-da-barragem-rejeitos-mineracao-principal-cao-desastres-ambientais-relatorio/).....	19
Figura 3-1: Localização da Mina Neves Corvo e complexo Mineiro de Neves Corvo, adaptado de Google Earth (17/07/2020).....	23
Figura 3-2 Planta geral da barragem do Cerro do Lobo, adaptado de Oliveira (2012) ..	24
Figura 3-3: Plano de divisão e respetiva geometria das 15 células através da construção de diques com escombros da mina (Oliveira, 2011)	25
Figura 3-4: Transferência da amostra para os respetivos peneiros.....	26
Figura 3-5: Realização do ensaio de peneiração recorrendo à peneiração mecânica.....	27
Figura 3-6: Representação do densímetro para a correção do menisco	27
Figura 3-7: Representação de diferentes distâncias do densímetro para a correção da sua escala.....	28
Figura 3-8: Aspeto do solo durante a execução do ensaio de sedimentação	29
Figura 3-9: Representação da curva granulométrica da amostra ensaiada.....	30
Figura 3-10: Gráfico com a representação do resultado do ensaio da determinação do Limite de Liquidez	33
Figura 3-11: Representação na Carta de Plasticidade de Casagrande a amostra em estudo.....	35
Figura 3-12: Picnómetro cheio com água destilada.....	36
Figura 3-13: Material transferido para o picnómetro após ter sido pesado e ter-lhe sido adicionada água destilada	37
Figura 3-14: Material contendo água destilada sujeito à ebulição	37
Figura 3-15: Equipamento cheio com água destilada pronto a pesar	38
Figura 3-16: Representação do picnómetro com hélio	39

Figura 3-17: Material ensaiado com grumos	40
Figura 3-18: Material ensaiado homogeneizado	40
Figura 4-1: Representação ilustrativa do método MT (Sze & Yang, 2014).....	46
Figura 4-2: Aplicação dos dois discos de látex e o papel de filtro	48
Figura 4-3: Fixação da membrana recorrendo a dois o-rings.....	48
Figura 4-4: Compactação das diferentes camadas utilizando um compactador.....	50
Figura 4-5: Aspeto final do provete após a sua montagem	51
Figura 4-6: Representação ilustrativa do método AP (Wood, 2008)	52
Figura 4-7: Representação ilustrativa do método WP (Wood, 2008).....	52
Figura 4-8: Representação esquemática do método de reconstituição proposto de solos contendo finos (Carraro e Prezzi, 2007).....	55
Figura 4-9: Montagem do método de reconstituição de amostras segundo Corrêa (2018).....	56
Figura 4-10: Sedimentação dos rejeitados para a reconstituição de provetes segundo Corrêa (2018)	57
Figura 4-11: Mecanismo inicial para reconstituição de provetes	58
Figura 4-12: Aspeto final do material resultante da primeira tentativa de reconstituição de provetes	58
Figura 4-13: Preparação da segunda tentativa de reconstituição de provetes	59
Figura 4-14: Colocação da mangueira e de um funil para depositar os rejeitados.....	59
Figura 4-15: Aspeto do provete resultante da segunda tentativa de reconstituição.....	60
Figura 4-16: Preparação do método final de reconstituição de provetes.....	61
Figura 4-17: Aspeto do provete após ter sido retirado o tubo superior	61
Figura 4-18: Remoção dos excessos de material sedimentado e regularização do topo do provete	62
Figura 4-19: Aspeto final do provete reconstituído.....	62
Figura 5-1: Representação do equipamento triaxial	66
Figura 5-2: Aspeto final do provete após a sua congelação	69
Figura 5-3: Alteração da permeabilidade com o grau de saturação (Reis, 2017).....	72
Figura 5-4: Movimento de uma partícula de água num maciço terroso (Matos Fernandes, 2006)	73
Figura 5-5: Experiência de Darcy (Matos Fernandes, 2006)	76
Figura 5-6: Representação do canal de topo no pedestal por onde sai a água percolada na fase de percolação com água.....	77
Figura 5-7: Representação do sensor de pressão que permite obter a pressão intersticial	78
Figura 5-8: Enumeração de todas as válvulas intervenientes durante a realização de um ensaio triaxial.....	79
Figura 5-9: Água percolada com cor alaranjada durante a determinação da permeabilidade.....	80
Figura 5-10: Representação do diâmetro das pedras porosas na base e topo do pedestal	81
Figura 5-11: Sinuosidade dos caminhos a percorrer pela água: a) Direção horizontal; b) direção vertical (Serra, 2009).....	82
Figura 5-12: Geometria do modelo incluindo a atribuição das respetivas condições de fronteira: a) modelo com o diâmetro das pedras porosas inferior ao provete; b) modelo com o diâmetro das pedras porosas igual ao do provete	84

Figura 5-13: Caudal e vetores de fluxo obtidos através do SEEP/W com o diâmetro das pedras porosas igual ao do provete	85
Figura 5-14: Caudal e vetores de fluxo obtidos através do SEEP/W com o diâmetro das pedras porosas inferior ao de um provete.....	86
Figura 5-15: Caudal percolado com uma anisotropia de 2: a) no modelo com o diâmetro das pedras porosas e do provete iguais; b) no modelo com o diâmetro das pedras porosas inferior ao do provete	88
Figura 5-16: Caudal percolado com uma anisotropia de 4: a)no modelo com o diâmetro das pedras porosas e do provete iguais ; b) no modelo com o diâmetro das pedras porosas inferior ao do provete	88

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2-1: Quadro síntese das principais características dos diferentes métodos construtivos de barragens de contenção (Soares, 2001)	16
Quadro 3-1: Representação dos diferentes teores em água obtidos com o limite de liquidez obtido	32
Quadro 3-2: Representação dos diferentes teores em água e limite de plasticidade obtidos	33
Quadro 3-3: Densidades obtidas através da norma NP-83:1965 utilizando o picnómetro com água destilada	42
Quadro 3-4: Densidades obtidas das diferentes amostras recorrendo à norma ASTM D5550-06 (ASTM, 2006) utilizando o picnómetro com hélio	43
Quadro 5-1: Valores do Coeficiente de Permeabilidade (Matos Fernandes, 2006)	70
Quadro 5-2: Classificação dos solos quanto à sua permeabilidade (Terzaghi & Peck, 1967)	70
Quadro 5-3: Representação das características atribuídas a cada um dos modelos	84
Quadro 5-4: Quadro com os fatores corretivos de acordo com a anisotropia	87

ABREVIATURAS E SIGLAS

AP- Air Pluviation

BP- Back Pressure

CP- Celk Pressure

ESTGV- Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu

ISO- International Organization for Standardization

LNEC- Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MT- Moist Tamping

NP- Norma Portuguesa

WP- Water Pluviation

NOTAÇÃO

a) ALFABETO LATINO

A- Área da secção da amostra

a_v - Coeficiente de compressibilidade

B- Parâmetro de pressão neutra

C- Concentração das partículas

c' - Coesão

D- Diâmetro das partículas

e- Índice de vazios

e_0 - índice de vazios inicial

H- Comprimento do “pescoço” do densímetro

h- Comprimento do bulbo do densímetro

IP- Índice de plasticidade

i- Gradiente hidráulico

K- Coeficiente de permeabilidade

K_h - Permeabilidade horizontal

K_v - Permeabilidade vertical

l- Altura do provete

LL- Limite de liquidez

LP- Limite de plasticidade

m- Massa da amostra

m_s - Massa da amostra seca

n- Porosidade

P- Pressão

Q- Caudal

r_k - Rácio

SG- Densidade da amostra

t- Variável temporal

U_n - Fator de sobrecompactação

V- Volume

Vh- Volume do bolbo do densímetro

v_s - velocidade de sedimentação.

w- Teor em humidade

w_0 - Teor de água inicial

z- Cota geométrica

b) ALFABETO GREGO

γ'_s - Peso volúmico submerso dos grãos sólidos

γ_w - Peso volúmico da água

η - viscosidade do fluído

ρ_s - Densidade das partículas sólidas

ρ_w - Massa volúmica da água

Δh - Valor da carga hidráulica

Δu - Variação da pressão neutra

1.Introdução

1.1. Enquadramento geral

Com o aumento da actividade mineira a nível mundial é de especial importância estudar a deposição e o comportamento dos rejeitados. Os rejeitados, conhecidos como material sem valor económico, derivam de processos físicos, químicos e mecânicos das fases de separação do produto que se pretende explorar (Costa, 2014). Os rejeitados constituem uma lama que contem uma grande quantidade de material fino maioritariamente constituída por material silteoso jovem. Após a sua deposição, os rejeitados, como apresentam uma baixa permeabilidade irão consolidar lentamente, dando origem ao aspecto final dos locais de armazenamento dos rejeitados. Para o depósito de rejeitados é necessário a construção de uma barragem de contenção. A construção de uma barragem implica uma série de restrições pelos impactos socioambientais causados.

A avaliação da segurança das estruturas de contenção decorre sobre o estudo dos rejeitados que a constituem. A compreensão sobre as inúmeras ruturas ocorridas em barragens por parte dos rejeitados provem maioritariamente de estudos laboratoriais controlados. Esses estudos, permitem também determinar a resistência máxima do material em estudo para diferentes densidades e diferentes tensões. Portanto, os ensaios laboratoriais têm um papel importante em relação à compreensão das respostas mecânicas por parte dos rejeitados. Para tal, é necessário reproduzir laboratorialmente o comportamento e o arranjo das partículas dos rejeitados *in situ*.

A reconstituição de amostras para a realização de ensaios triaxiais e estudo da liquefação, adquiriu maior importância devido às seguintes razões (Khalili e Wijewickreme, 2008):

- dificuldades em obter amostras in situ não perturbadas e com qualidade;
- Realizar ensaios em provetes homogêneos, sob diferentes estados e diferentes condições de tensão;
- necessidade de caracterizar materiais geotécnicos reproduzidos pelo homem.

1.2. Objetivos da dissertação

Um dos principais objetivos deste trabalho é o desenvolvimento de uma técnica de reconstituição de provetes utilizando rejeitados, resultantes dos processos industriais de extração mineira. De uma forma sintética, com esta dissertação pretende-se:

- resumir a informação que já foi publicada acerca dos rejeitados;
- classificar os rejeitados, através da realização de ensaios de identificação;
- estudo de publicações sobre técnicas de reconstituição de provetes para ensaios triaxiais desenvolvidas por outros autores;
- adaptar as técnicas de reconstituição de provetes procurando reproduzir fenómenos que ocorrem nas instalações de deposição de rejeitados;

Para além disto, outro dos objetivos desta dissertação, é avaliar a forma como se pode aproveitar a realização de um ensaio triaxial para determinar a permeabilidade dos rejeitados. Além disto, outro dos objetivos, é analisar as diferenças obtidas no cálculo da densidade das partículas sólidas segundo NP-83: 1965 e a norma ASTM D5550-06 (ASTM, 2006). Ademais, averiguar qual dos métodos é mais vantajoso em relação ao procedimento realizado e ao tempo necessário para realizar cada um dos procedimentos.

1.3. Organização e estrutura do texto

De forma a concretizar todos os objetivos apresentados anteriormente, a dissertação foi organizada em 5 capítulos:

- O capítulo 1 apresenta o âmbito e os objetivos do trabalho;
- O capítulo 2 é relativo ao estado de arte. Este capítulo contém uma introdução aos rejeitados e as suas formas de produção. De seguida, descrevem-se as formas de deposição e as técnicas de construção de barragens de contenção de rejeitados. São referidos também os aspetos relacionados com o comportamento dos rejeitados bem como as causas de rotura das barragens de contenção.
- O capítulo 3 é dedicado à caracterização da amostra recolhida in situ. Apresentam-se as metodologias de ensaio utilizadas assim como os resultados obtidos dos ensaios de caracterização da amostra. Para a determinação da densidade das partículas sólidas realizaram-se ensaios utilizando diferentes técnicas de acordo com diferentes normas, de modo a analisar os diferentes valores obtidos para cada uma delas.
- O capítulo 4 reúne e caracteriza as técnicas de reconstituição de provetes mais utilizadas em laboratório. Além disso, descreve-se um novo equipamento que tornou possível a criação de provetes que possibilitou reproduzir os fenómenos que ocorrem nas instalações de deposição de rejeitados.
- O capítulo 5 descreve a metodologia do ensaio triaxial. O capítulo apresenta ainda um estudo sobre a redução do caudal num ensaio triaxial causado pelo estrangulamento devido à redução do diâmetro das pedras porosas.
- O capítulo 6 contém as principais conclusões e os caminhos para potenciais desenvolvimentos futuros.

2. Estado da arte

2.1. Produção de rejeitados

Nas últimas décadas, a atividade mineira teve um enorme crescimento mundial e o avanço tecnológico possibilitou o desenvolvimento de novas técnicas de extração. Por sua vez, as novas técnicas facilitaram os processos de extração, contribuindo para um aumento da procura de minerais e metais (Costa, 2014). O crescimento da atividade mineira levou a um aumento exponencial do volume de rejeitados produzidos. Os rejeitados, conhecidos como material sem valor económico significativo, resultam de uma série de processos que os separam dos minerais de valor. Os processos a que os rejeitados estão sujeitos, entre a fase de extração e deposição, determinam as suas propriedades físicas, químicas e mecânicas (Raposo, 2016). Normalmente, os processos a que os rejeitados estão sujeitos são comuns a todas as minas, tal como se pode verificar na figura que se segue (Figura 2-1). No entanto, poderão existir algumas particularidades e os processos sofrerem uma pequena variação (Vick, 1990).

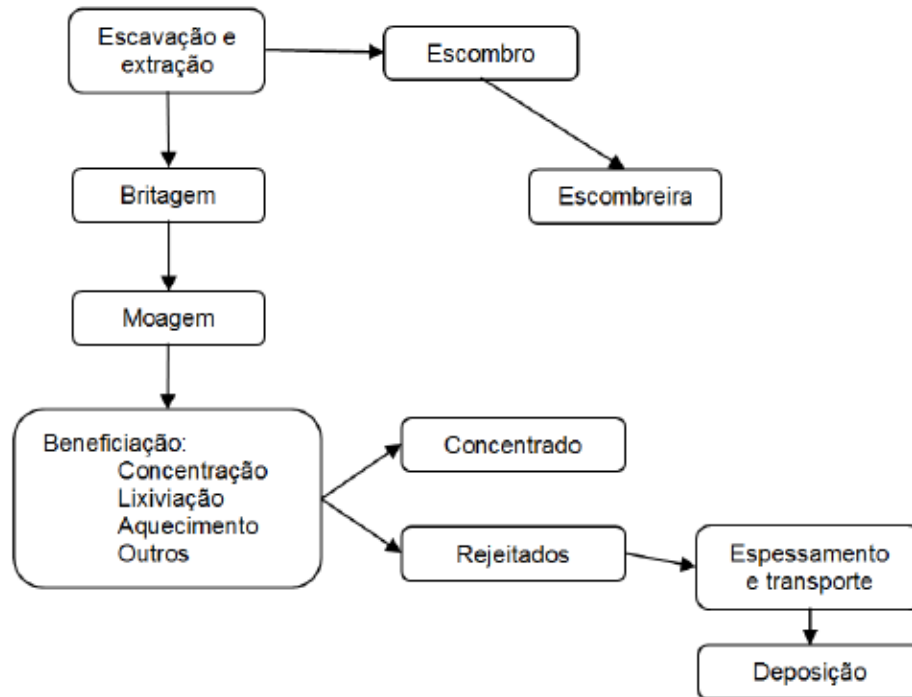


Figura 2-1: Esquema geral dos processos de exploração de minério bruto (adaptado de Russo, 2007)

Tal como se pode constatar na Figura 2-1, as primeiras fases são a escavação e a extração. Para se chegar ao minério é necessário escavar grandes quantidades de rocha. Esta rocha designa-se como escombros, sendo normalmente depositada nas escombreiras sem sofrer nenhum tipo de tratamento (Raposo, 2016).

Seguidamente, ocorrem as fases de britagem e moagem da rocha. Estas etapas permitem uma redução das dimensões da pedra até um tamanho desejado (Costa, 2014). A fase de britagem ocorre em primeiro lugar, diminuindo as dimensões dos fragmentos da pedra para uma dimensão adequada, de modo a serem introduzidos no equipamento de moagem (Krizek, 2004). A britagem ocorre com o objetivo de facilitar o transporte dos fragmentos da pedra para a superfície.

Sucessivamente, ocorre a fase de concentração que tem como finalidade separar o minério dos rejeitados. Para o processo de separação podem ser utilizados diversos métodos, destacando-se a separação gravítica, separação magnética e flotação (Raposo, 2016). É importante referir que a flotação é o método mais utilizado e é a primeira fase do processo de extração em que existe uma introdução de reagentes químicos (Vick, 1990). Para complementar a fase de concentração podem-se utilizar os processos de

lixiviação e aquecimento, uma vez que a lixiviação consiste na utilização de reagentes que dissolvem os minerais, transformando-os em sais solúveis (Raposo, 2016). Segundo Krizek (2004), a transformação em sais realiza-se através de um solvente, geralmente uma solução forte, ácida ou alcalina dependente do minério em exploração.

Após estas fases restam duas misturas, o concentrado, que contém elevada quantidade de minério e, o rejeitado, que é composta por quantidades residuais de minério sem valor económico apreciável (Raposo, 2016). Os rejeitados após as fases de beneficiação apresentam um aspeto e uma consistência idêntica a de uma lama. De forma a melhorar o processo mineiro, às fases anteriormente descritas, sucede-se o processo de espessamento. Para proceder-se ao espessamento pode recorrer-se a espessadores ou a hidrociclones. No entanto, os espessadores são os mecanismos mais utilizados pois apresentam menores custos operacionais e recuperam diretamente a água de circulação. Este processo produz rejeitados espessados ou em pasta, reduzindo a quantidade de água contida juntamente com o material, tornando os rejeitados com um aspeto mais sólido (Costa, 2014). A água retirada poderá ser reutilizada de novo nos processos de extração e poderá ser utilizada para melhorar as propriedades dos rejeitados e facilitar a sua forma de deposição (Raposo, 2016). O espessamento tem como objetivo melhorar as propriedades dos rejeitados e reduzir o impacto ambiental, através da redução da área afetada pela deposição. Através do espessamento, é possível otimizar a capacidade disponível para aterro, armazenando uma maior quantidade de rejeitados, não sendo necessário sucessivos alteamentos, de forma a aumentar a área de deposição.

Para além disso, é possível otimizar a estabilidade geotécnica, pois os rejeitados tornam-se mais coesos, aumentando as suas características resistentes. Este processo tem vindo a ser melhorado ao longo dos anos, através da adição de flocculantes, modificando a composição da pasta (Costa, 2014). A adição de flocculante junta as partículas em grupos de múltiplas partículas, contribuindo para um melhoramento do comportamento dos rejeitados (Salfate, 2011). Com o aumento do peso das partículas sólidas por unidade de peso da lama, os rejeitados podem ser classificados de diferentes formas como demonstra a Figura 2-2. Os rejeitados sob forma de lama têm um teor de sólidos compreendido entre os 30% e os 50%. A lama ao ser submetida ao processo de espessamento fica com teores de sólidos de 50% a 70%, passando a ser designada como rejeitados espessados (Raposo, 2016). O espessamento faz com que o material aumente

a sua densidade, adquira viscosidade e, ao contrário das lamas, não apresente segregação das partículas enquanto são transportados (Costa, 2014). Durante o processo de espessamento, com o aumento da viscosidade e a evolução da quantidade de partículas sólidas, obtém-se os rejeitados sob forma de pasta, com 70% a 75% de densidade de sólidos e, por fim, os rejeitados filtrados com densidade de sólidos superior a 75%.

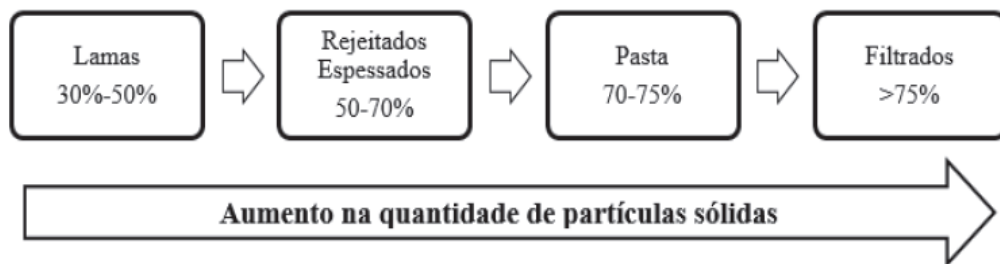


Figura 2-2: Evolução da quantidade de partículas sólidas durante o processo de espessamento (Costa, 2014)

Independentemente da forma em que os rejeitados se encontram, o seu transporte é realizado de forma idêntica. Contudo, o sistema de transporte para a opção de lama tem de sustentar mais do que duas vezes o volume de rejeitados em relação à pasta (Costa, 2014). Normalmente, após ocorrer o espessamento dos rejeitados, existem bombas de deslocamento positivo que transportam, através de condutas, os rejeitados até ao seu ponto de deposição. No caso de transporte de rejeitados sob forma de lama, tem de haver mais bombas de rejeitados, as condutas têm de ser mais largas e são necessárias mais bombas de recuperação de água. Uma das alternativas ao transporte através de condutas é a utilização de camiões. Cerca de 90% da estrutura dos rejeitados criada no processo de espessamento, durante o transporte é destruída, levando a alterações nas propriedades do material (Jewell & Fourie, 2006). Uma das alterações mais visíveis nas propriedades da estrutura dos rejeitados é a diminuição da sua viscosidade (Salfate, 2011).

2.2. Formas de deposição dos rejeitados

Após o transporte dos rejeitados das centrais até à bacia, o material precisa de ser depositado. A deposição dos rejeitados varia consoante as características do

material, o *layout* da barragem, a área de deposição disponível, o grau de espessamento, entre outros (Coqueira, 2014). Os métodos de deposição habitualmente utilizados são a convencional, a subterrânea e a de rejeitados espessados, pasta, ou rejeitados filtrados.

Na deposição convencional não ocorre o processo de espessamento dos rejeitados (Raposo, 2016). Nesta deposição, os rejeitados podem ser depositados subaereamente sobre os rejeitados depositados anteriormente, ou também podem ser depositados de forma subaquática, lançando os rejeitados para o interior da albufeira da barragem de contenção.

A deposição de lamas subaereamente, representada na Figura 2-3, exibe maior número de limitações devido a um risco mais elevado na formação de ácidos em relação à deposição subaquática (Costa, 2014). Os rejeitados depositados de forma subaérea, quando lançados formam ligeiras pendentes com uma certa inclinação. Esta inclinação é dependente da composição granulométrica dos rejeitados (Raposo, 2016). Os rejeitados com granulometria mais grossa ficam mais próximos dos pontos de descarga do que os rejeitados com granulometria mais fina. Neste tipo de deposição é corrente haver segregação dos rejeitados causando diferenças na densidade de partículas sólidas (Robinsky, 2000).



Figura 2-3: Deposição subaérea de rejeitados (Coqueira, 2014)

A deposição subaquática (Figura 2-4) é feita por baixo de água e é mais indicada para materiais suscetíveis a oxidar, mobilizar metais e produzir ácidos (Tremblay, 1998), uma vez que o acesso ao oxigénio fica impedido não havendo a reação de

oxidação. Para este tipo de deposição é necessária a construção de barragens de contenção, de modo a isolar o material do ecossistema. A deposição subaquática tem de ser realizada de forma controlada, para não contaminar os cursos de água naturais e não poluir o ambiente.



Figura 2-4: Deposição subaquática de rejeitados (Engels, 2006)

A deposição de rejeitados sob forma de pasta pode ser realizada de diferentes formas dependendo da topografia do terreno (Costa, 2014). No caso da deposição em zonas planas (Figura 2-5.a), a descarga é feita sobre um ou mais pontos centrais formando cumes de descarga. No caso de a descarga ser feita em zonas com declive (Figura 2-5.b), os rejeitados são depositados em zonas altas até o material escorrer e atingir o seu ponto de repouso. Quanto menor a quantidade de água dos rejeitados, maior será a inclinação dos taludes formados pelos rejeitados depositados (Raposo, 2016).

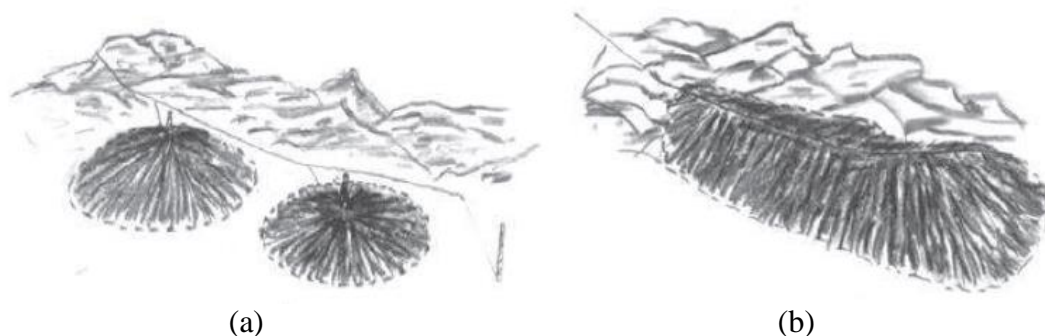


Figura 2-5: Deposições típicas de rejeitados espessados e/ou em pasta (Robinsky, 2002): a) descarga a partir de um ponto central; b) descarga em locais com declive

A deposição subterrânea consiste na utilização dos rejeitados para o enchimento das cavidades subterrâneas que foram geradas durante as escavações para a extração do minério. A deposição dos rejeitados sob forma de pasta subterraneamente, diminui a deposição de material à superfície e, conseqüentemente, diminui as dimensões das instalações de deposição, reduzindo os custos da deposição (Raposo, 2016). Geralmente, é adicionado à pasta um ligante hidráulico, criando a coesão necessária que provoca estabilidade à cavidade e possibilita a exploração de zonas adjacentes (Belem e Benzaazoua, 2004). Na situação de enchimento e aproveitamento total subterrâneo, consegue-se depositar no subsolo cerca de 50% dos rejeitados produzidos (Aldea e Connolly, 2014).

2.3. Armazenamento de rejeitados

A forma mais corrente para o armazenamento de rejeitados é a construção de barragens de deposição de rejeitados. Normalmente, são construídas com a utilização de materiais de empréstimo da zona da implantação da bacia ou por escombros produzido durante a exploração da mina (Coqueira, 2014). Esses materiais que são utilizados para além das características de permeabilidade e compressibilidade, devem ser quimicamente estáveis (Caldeira & Terezinha, 2010). Independentemente da técnica de construção aplicada, sempre que a capacidade da barragem for atingida, nos sucessivos alteamentos, poderão ser utilizados os rejeitados resultantes da etapa de beneficiamento do minério ou escombros, à medida que são produzidos (Coqueira, 2014).

A utilização dos próprios rejeitados, nos alteamentos das barragens de contenção, permitem a redução dos custos e dos impactos ambientais (Carvalho, 2018).

As barragens de contenção de rejeitados (Figura 2-6) são idênticas às barragens de retenção de água (Rodrigues, 2016). No entanto, apesar das barragens de contenção de rejeitados e de água basearem-se nos mesmos princípios geotécnicos e visto que o material armazenado é diferente nas duas circunstâncias, o projeto tem de sofrer algumas adaptações (McLeod & Murray, 2003). Após o fim da exploração da mina, as barragens de contenção são fechadas e o material lá depositado não é removido. Como tal, as desativações das barragens terão de ser efetuadas de forma segura e com a sua manutenção perdurável sem custos ou com custos reduzidos (Rodrigues, 2016).



Figura 2-6: Barragem convencional em aterro compactado (adaptado de EPA, 1994)

Para a construção de uma barragem de rejeitados existem uma série de recomendações básicas nas quais destacam-se (DNPM, 2002):

- deverá ser antecedida de um projeto de execução;
- será necessário evitar possíveis arrastamentos de materiais para rios, lagos ou outros cursos de água;
- nas periferias das áreas das barragens deverão existir apenas edificações operacionais;
- no sistema de deposição terá de ser instalada monitorização, de forma a verificar a qualidade dos efluentes;
- durante a fase de construção da barragem será necessário realizar análises de risco.

Para qualquer método de construção, deve-se ter em atenção a topografia e a sismicidade do local de implantação. A distância entre a área de deposição e a área da mina deve ser a menor possível (Caldeira & Terezinha, 2010). Segundo Blight (2010),

existem três métodos de construção de barragens de rejeitados por sucessivos alteamentos:

- método de montante;
- método de jusante;
- método de construção central.

2.3.1. Método de Montante

O método de Montante é o mais antigo, mais económico e o que apresenta maior facilidade de execução entre os três métodos (Esposito, 2000). Inicia-se com a construção de um dique inicial (Figura 2-7) em que os rejeitados são depositados, a partir da crista do dique (Coqueira, 2014). As partículas de fração grossa, presentes nos rejeitados, ao serem depositadas dão origem à praia que servirá de fonte para a construção do próximo dique (Carvalho, 2018). Os alteamentos repetem-se até a barragem atingir a cota máxima definida para o projeto. A deposição dos rejeitados tem também a função de revestir o talude com o objetivo de reduzir a permeabilidade. É importante avaliar se os rejeitados têm todas as condições necessárias para apoiar a construção de um novo dique (Coqueira, 2014). Este método é adequado para explorações em que não seja necessário armazenar grandes quantidades de água em regiões com clima árido (Raposo, 2016). Também é relevante referir que apresenta um risco elevado de rotura, uma vez que é difícil realizar o controle da qualidade do maciço, porque os alteamentos são feitos sobre a praia dos rejeitados. Para além disso, o método é suscetível à liquefação, caso os rejeitados que compõem as praias estejam em estado solto e saturado (Coqueira, 2014). Por fim, o método também é suscetível à erosão interna, devido ao posicionamento da linha freática, aumentando as chances de surgir água no talude (Carvalho, 2018).

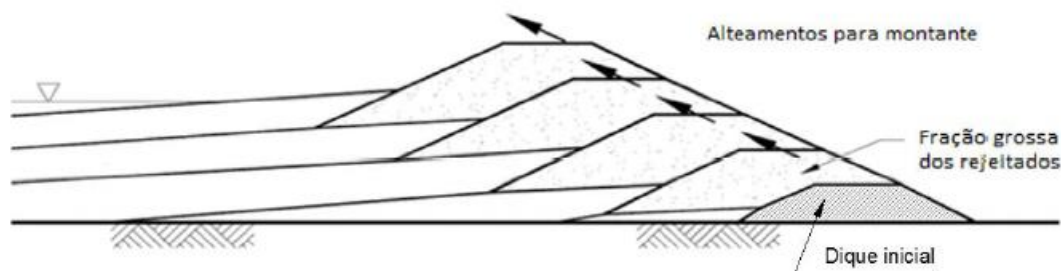


Figura 2-7: Método de montante de construção de barragens de rejeitados (adaptado de State of Victoria, 2006)

2.3.2. Método de Jusante

No método de jusante os eixos centrais dos diques progredem para jusante até atingir a cota máxima de projeto (Carvalho, 2018). A construção dos novos diques é realizada com a utilização da fração grossa dos rejeitados ou com solos de áreas de empréstimo. Para diminuir a possibilidade de ocorrer infiltrações e diminuir a suscetibilidade à liquefação, a parede do dique a montante deverá ser protegida com uma camada impermeável ou os sucessivos diques deverão ser compactados (Coqueira, 2014).

Em comparação com o método de montante, este apresenta diversas vantagens, referido por Klohn (1982), citado por Russo (2007):

- a barragem é construída sobre um terreno natural e não sobre rejeitados pouco consolidados;
- a barragem pode ser formada recorrendo a técnicas tradicionais como recorrer a aterro compactado, aumentando a segurança da barragem;
- é possível a execução de um sistema de drenagem interno eficiente, que pode ser construído durante todo o processo de alteamento, permitindo um maior controlo do nível freático e, por consequência, melhorar a sua estabilidade;
- a estrutura da barragem é mais segura e resistente a carregamentos dinâmicos, tais como forças sísmicas;

Este método tem custos de construção superiores em comparação com o método analisado anteriormente, assim como a área ocupada pela fundação da barragem ser superior, uma vez que aumenta sempre que se constrói um novo alteamento (Raposo, 2016).

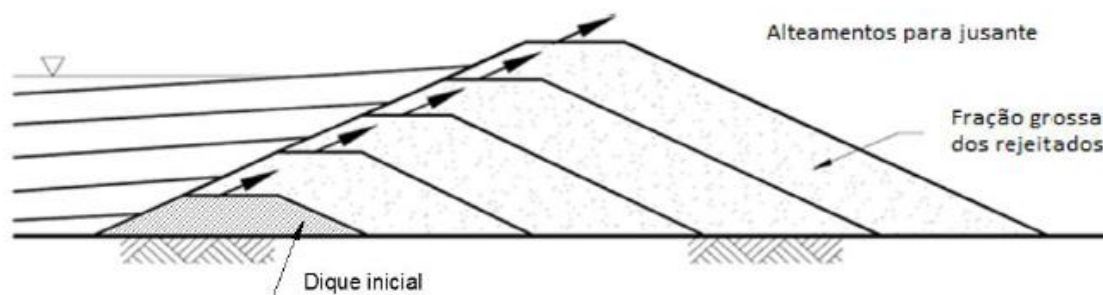


Figura 2-8: Método de jusante de construção de barragens de rejeitados (adaptado de State of Victoria, 2006)

2.3.3. Método de Construção Central

A construção de uma barragem através do método de construção central é idêntica aos métodos apresentados anteriormente. Inicia-se a partir de um dique inicial (Figura 2-9) e os sucessivos alteamentos são construídos sobre a praia formada pela deposição de rejeitados e o talude a jusante do dique inicial (Carvalho, 2018). Durante a construção dos novos diques, os rejeitados colocados sobre a inclinação de jusante devem ser comprimidos, de forma a evitar falhas de corte (Coqueira, 2014). A nível económico, este método é mais caro do que o de montante, mas mais económico em relação ao de jusante. A construção de uma barragem, a partir deste método, é uma operação complexa pois são necessários mecanismos para a deposição de material a jusante do dique e para comprimir o material.

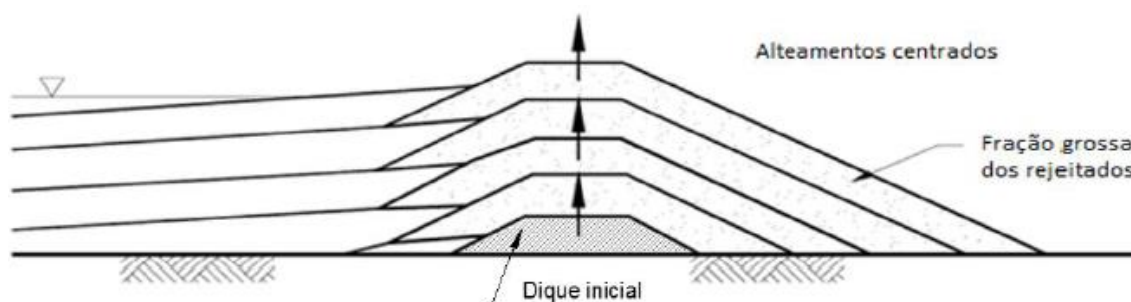


Figura 2-9: Método de construção central de barragens de rejeitados (adaptado de State of Victoria, 2006)

Com o quadro seguinte pode-se analisar as diferenças entre os três métodos abordados anteriormente. Atualmente, o método de montante é o mais utilizado pois

permite que os alteamentos sejam realizados a uma maior velocidade e a um menor custo. No entanto, o método de jusante é o que oferece uma maior segurança.

Quadro 2-1: Quadro síntese das principais características dos diferentes métodos construtivos de barragens de contenção (Soares, 2001)

	Método de montante	Método de jusante	Método linha de centro
Características gerais	<ul style="list-style-type: none"> •Método mais antigo, sendo o mais empregado na atualidade. •Lançamento a partir da crista por "spigots" (as frações grossas se depositam junto ao corpo da barragem). •Também podem ser usados hidrociclones. 	<ul style="list-style-type: none"> •Construção de dique inicial impermeável e barragem de pé. •Separação dos rejeitos na crista do dique por meio de hidrociclones. •Barragem com dreno interno e impermeabilização a montante. 	<ul style="list-style-type: none"> •Variação do método de jusante.
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> •Menor custo. •Maior velocidade de alteamento. 	<ul style="list-style-type: none"> •Maior segurança. • Compactação de todo o corpo da barragem. 	<ul style="list-style-type: none"> •Variação do volume de "underflow" em relação ao método de jusante.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> •Maior probabilidade de instabilidade devido à presença de finos não adensados junto ao corpo da barragem. •Baixa compacidade do material; possibilidade de liquefação. 	<ul style="list-style-type: none"> •Necessidade de grandes quantidades de "underflow" (problemas nas 1^{as} etapas). •Deslocamento do talude de jusante (proteção superficial só no final da construção). 	<ul style="list-style-type: none"> •Pode ser necessária a extensão dos trabalhos de compactação a montante do eixo da barragem.

2.4. Operação e Controlo das barragens de contenção dos rejeitados

As operações e controlo das bacias de rejeitados têm como principal objetivo a elaboração de um plano de contingência, de modo a identificar e eliminar danos para garantir as condições de segurança da estrutura. Deverão existir estudos a nível hidrológico, hidrogeológico, sismológico e geotécnico. Para estes estudos, é necessário caracterizar todo o material envolvido, desde o material que constitui o corpo da barragem ao material depositado. O controlo das estruturas deve ser realizado de forma contínua por uma equipa com prática adequada, para realizar trabalhos de inspeção e manutenção, de modo a não colocar a estabilidade da estrutura em risco. Para o controlo é necessário realizar-se inspeções visuais e inspeções instrumentalizadas (Caldeira & Terezinha, 2010).

2.4.1.Principais causas dos acidentes em barragens de rejeitados

A eliminação dos acidentes e incidentes devem ser a principal preocupação de todos os responsáveis pela indústria mineira. Neste caso, acidente corresponde a uma anomalia de grande dimensão que está relacionado com a rotura parcial ou total de uma obra que põe em causa a sua funcionalidade (Coqueira, 2014).

As anomalias que tornam as barragens mais vulneráveis são os galgamentos causados pelas águas de enchentes, a erosão interna dos taludes, liquefação, colapso da barragem devido a um aumento rápido dos diques, subida dos níveis da água na bacia e problemas ou falta de canalização. No entanto, a causa que leva à rotura das barragens mais frequente são as condições atmosféricas como demonstra a Figura 2-10.

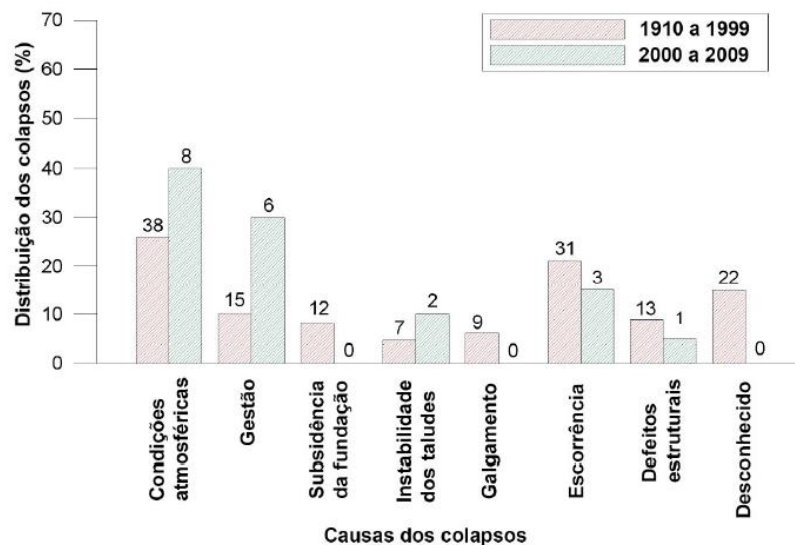


Figura 2-10: Causas dos acidentes ocorridos em barragens de rejeitados em dois períodos diferentes de tempo (adaptado de Azam & Li, 2010)

2.4.2.Referência histórica de alguns acidentes em estruturas de deposição de rejeitados

As barragens de deposição e contenção de rejeitados são estruturas complexas e dinâmicas que requerem cuidados especiais na investigação de campo, elaboração de projetos, construção, operação, monitorização e manutenção das estruturas (Esposito, 1995). Uma das formas para a prevenção de futuras falhas e possíveis acidentes pode ser através de lições obtidas de acidentes ocorridos anteriormente. Os acidentes ocorridos a partir da rutura de uma barragem de contenção poderão ter grandes dimensões e causar muitos danos em povoações próximas destruindo estruturas e provocando a morte de muitas pessoas. Ao longo dos últimos anos têm ocorrido alguns acidentes como (Carvalho, 2018):

- Stava (Itália, 19/07/1985) - Este acidente ocorreu devido ao colapso de duas barragens. O armazenamento dos rejeitados realizava-se numa encosta e havia duas barragens com localização muito próximas. Quando o talude de uma das barragens sofreu rutura, a barragem que se encontrava num nível inferior acabou por ruir. Este acidente levou à perda de 268 pessoas, de muitos edifícios. Grande parte da fauna e flora que se encontrava naquela região foi destruída, visto que morreram animais, foram destruídas árvores e até um rio foi afetado. Ainda sem apontar responsabilidades, tudo indica que esta rutura deveu-se à falta de inspeção e fiscalização da estrutura durante um período superior a 20 anos. Para além disso, a estrutura tinha alguns problemas tal como, a falta de drenagem, o que implicou que o material depositado não sedimentasse. Por fim, também é importante mencionar que as barragens tinham alturas e inclinações muito elevadas.
- Baia Mare (Roménia, 30/01/2000) - A formação de gelo sobre a barragem que posteriormente se derreteu, originou uma subida do nível médio da água que causou a rutura da barragem. Os danos causados pela libertação das lamas foram sobretudo a nível da fauna e flora. As águas ficaram contaminadas e o seu abastecimento ficou interdito a milhões de pessoas. Os problemas que deram origem a esta situação foi a inexistência de monitorização dos níveis de água, sistema a trabalhar em circuito fechado sem previsões de descargas de emergência, falta da caracterização do material depositado e condições meteorológicas severas.

Para além destes acidentes, ocorreram muitos outros que acabaram por deixar uma marca negativa em muitas regiões (Figura 2-11). Assim, verifica-se que as barragens de contenção de rejeitados são estruturas complexas e de grande dimensão que necessitam de uma gestão de segurança, tanto na sua fase de projeto como na sua construção e exploração, de modo a proporcionar segurança estrutural e ambiental.



Figura 2-11: Rutura da barragem de Samarco retirada de (<https://brasil.mongabay.com/2018/03/rompimento-da-barragem-rejeitos-mineracao-principal-causa-desastres-ambientais-relatorio/>)

3. Propriedades básicas dos rejeitados

3.1. Introdução

No presente capítulo descrevem-se algumas propriedades básicas dos rejeitados e, para tal, foram analisados os trabalhos experimentais realizados como a determinação da curva granulométrica, através da peneiração e sedimentação, a determinação dos limites de Atterberg e a determinação do peso volúmico das partículas. Para cada uma destas propriedades foram apresentadas diferentes metodologias de ensaio e preparação de amostras, bem como as respetivas normas utilizadas. Na determinação da densidade das partículas sólidas foram realizados diferentes ensaios correspondentes a diferentes normas que permitiram realizar uma comparação dos diferentes métodos. As normas utilizadas foram NP-83: 1965 e ASTM D5550-06 (ASTM, 2006). Na NP-83:1965, o peso específico foi determinado tomando em consideração a variação da densidade das partículas com a temperatura enquanto que na ASTM D5550-06 (ASTM, 2006), esta determinação foi realizada recorrendo a um picnómetro com hélio. Para além da comparação entre os dois métodos, foram realizados ensaios recorrendo ao picnómetro com hélio, de modo a verificar as diferenças entre as densidades obtidas dependendo do estado em que a amostra foi ensaiada.

Os trabalhos experimentais apresentados neste capítulo foram todos realizados nas instalações da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu no laboratório de geotecnia.

3.2. Caracterização do material em estudo

O material caracterizado neste capítulo foi proveniente da Mina de Neves Corvo, que está localizada na sub-região do Baixo Alentejo, no distrito de Beja e nos concelhos de Castro Verde e Almodôvar (Figura 3-1). O jazigo foi descoberto pela Sociedade Mineira de Santiago, em 1977, e a sua laboração teve início em 1988 pela Somincor-Sociedade Mineira de Neves Corvo. O jazigo é composto maioritariamente por cobre, zinco e estanho. A mina de Neves Corvo é a maior mina portuguesa e a segunda maior mina de cobre da Europa. Esta mina tem uma grande importância mundial devido à sua tonelagem e pelos elevados teores de cobre e estanho (Oliveira, 2012). No jazigo, situado entre os 200 m e os 1200 m de profundidade, foram definidas reservas e recursos de mais de 300 milhões de toneladas de minério bruto (Raposo, 2016).



Figura 3-1: Localização da Mina Neves Corvo e complexo Mineiro de Neves Corvo, adaptado de Google Earth (17/07/2020)

Inicialmente, os rejeitados produzidos eram depositados na albufeira da barragem do Cerro de Lobo (Figura 3-2) à cota 244 m acima do nível médio da água do mar. Com o passar do tempo, surgiu a necessidade de aumentar a capacidade da barragem, estando atualmente com uma cota de 255 m, formando uma albufeira de 1,8 km² de área com capacidade de armazenamento de 20×10^6 m³ (Raposo, 2016). No

princípio, os rejeitados eram armazenados subaquaticamente, no entanto, como apresentavam teores elevados de sulfuretos que desencadeavam um elevado potencial de acidificação, a sua deposição teve de ser reajustada (Costa, 2014).

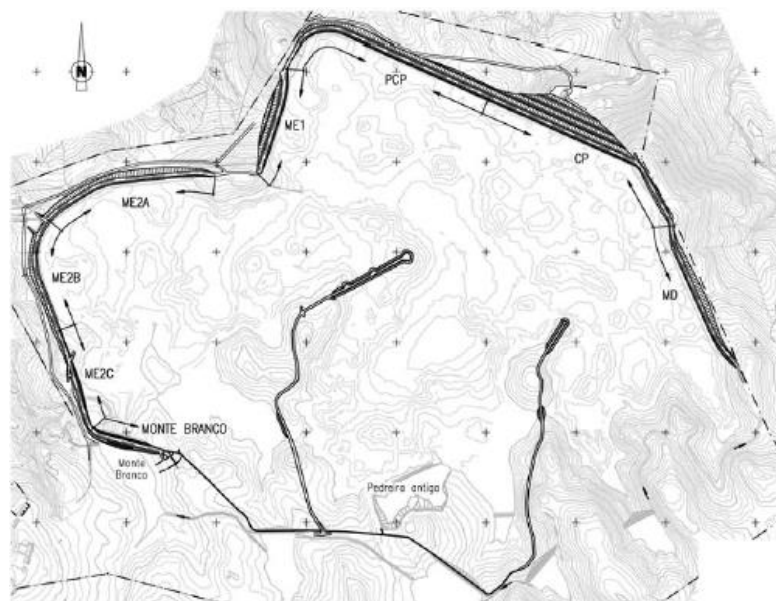


Figura 3-2 Planta geral da barragem do Cerro do Lobo, adaptado de Oliveira (2012)

Durante a exploração da mina foram encontradas novas reservas mineiras o que implicou arranjar uma alternativa para a deposição dos rejeitados, pois a barragem atingiu a sua cota máxima prevista no projeto inicial. Como a construção de uma nova barragem era dispendiosa, visto que seria necessário adquirir novos terrenos e o tempo de licenciamento seria demoroso, optaram pela construção de diques em escombros da albufeira (Raposo, 2016). Para isso, a albufeira foi dividida em 15 células, como demonstra a Figura 3-3, construindo os diques sobre os rejeitados depositados subaquaticamente. Os rejeitados passaram a ser depositados de forma subaquática para uma forma emersa sobre forma de pasta. O enchimento das células permite um encerramento sequencial e a sua cobertura (Oliveira, 2011). Desta forma é possível limitar a evaporação e manter a pasta com um elevado grau de saturação e, por conseguinte, minimizar a drenagem ácida, ao evitar que os rejeitados entrem em contacto com o oxigénio do ar (Raposo, 2016).

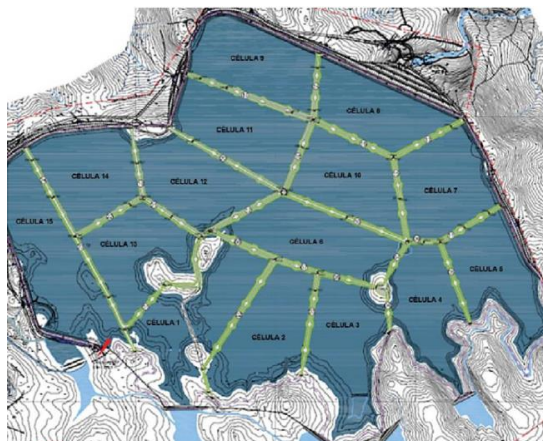


Figura 3-3: Plano de divisão e respetiva geometria das 15 células através da construção de diques com escombros da mina (Oliveira, 2011)

3.3. Análise Granulométrica

3.3.1. Introdução

Para a caracterização do material foi realizada uma análise granulométrica determinando-se a distribuição das partículas do rejeitado, de acordo com as suas dimensões.

Este ensaio baseia-se na determinação dos diâmetros das partículas que integram o rejeitado e foram utilizados dois processos, o ensaio de peneiração e o de sedimentação. No ensaio de peneiração utilizou-se partículas com dimensões superiores a 0,063 mm e no de sedimentação partículas cujas dimensões são inferiores a 0,063 mm. Para o de peneiração recorreu-se à crivagem com peneiros de redes com aberturas de diâmetros conhecidos. O ensaio da sedimentação foi realizado com base na lei de Stokes que estabelece o tamanho das partículas finas, segundo a sua velocidade de queda numa proveta, juntamente com uma solução antifloculante em diferentes espaços de tempo.

A análise granulométrica teve como base a CEN ISO/TS 17892-4:2004, no entanto, existem outras normas que possibilitam a concretização destes ensaios como LNEC E 196-1966.

3.3.2. Peneiração

Para a realização deste ensaio é necessário a amostra encontrar-se homogeneizada. No entanto, o tamanho das partículas é idêntico, portanto não foi

necessário dividir a amostra recorrendo a um repartidor com o objetivo de criar uma subamostra.

Primeiramente, foi determinado o teor em água, segundo a NP-84, recorrendo a uma estufa com temperaturas a oscilar os 105°C. Posteriormente, fizeram-se as diferentes pesagens na balança para esta determinação. De seguida, os grumos foram eliminados, juntando à amostra 100 ml de um agente dispersante, dentro de uma misturadora (cerca de 20 minutos). Depois, através do peneiro de 0,063 mm, realizou-se a lavagem do material. As partículas resultantes da lavagem e que passaram neste peneiro foram transferidas para uma proveta, que foi utilizada de seguida no ensaio da sedimentação. O material que não passou no peneiro 0,063 mm foi novamente à estufa. Após a secagem do material, este foi transferido para os peneiros de 2mm, 1mm, 500µm, 250µm, 125µm, 63µm e <63µm (Figura 3-4), e procedeu-se à peneiração mecânica (Figura 3-5) pesando-se cada uma das frações retidas em cada um dos peneiros.



Figura 3-4: Transferência da amostra para os respetivos peneiros



Figura 3-5: Realização do ensaio de peneiração recorrendo à peneiração mecânica

3.3.3. Ensaio de Sedimentação

3.3.3.1. Calibração do densímetro

De acordo com a norma, para a realização deste ensaio foi necessário a calibração do densímetro para minimizar os erros de leitura. Para isto, foi necessário realizar a correção do menisco que consiste em colocar o densímetro numa proveta com aproximadamente 800 ml de água e determinar a diferença de leituras. Esta distinção de leituras é a diferença entre os valores A e B representados na Figura 3-6.

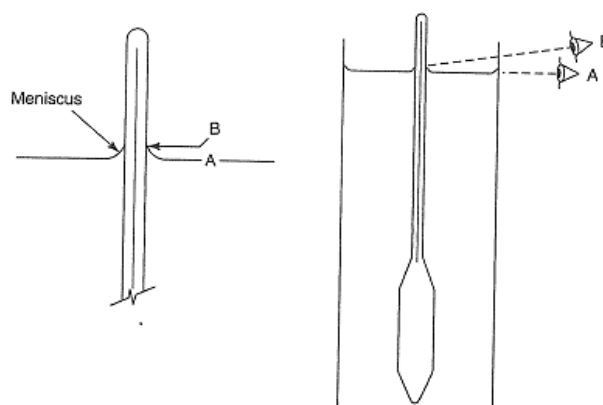


Figura 3-6: Representação do densímetro para a correção do menisco

Para além da correção do menisco foi necessário medir as diferentes distâncias representadas na (Figura 3-7) com o objetivo de realizar a correção da escala através da equação (3-1).

$$Hr = H + 0,5 \left(h - \frac{Vh}{900} L \right) \quad (3-1)$$

em que:

H - comprimento do “pescoço” do densímetro;

h - comprimento do bulbo do densímetro;

L - corresponde à distância entre 100 e os 1000 ml da proveta;

Vh - é o volume do bulbo do densímetro.

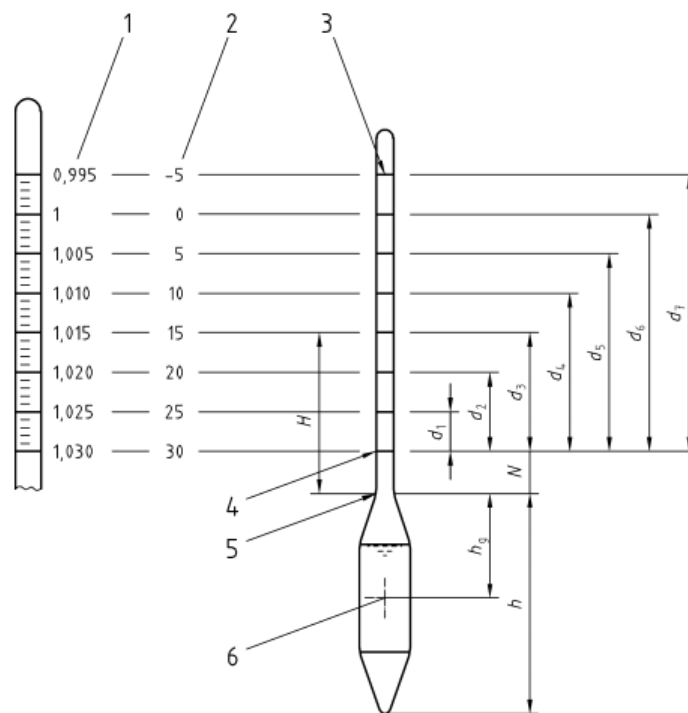


Figura 3-7: Representação de diferentes distâncias do densímetro para a correção da sua escala

Para além destas calibrações foi realizada a correção da temperatura com o auxílio da tabela fornecida na norma, determinando o erro e a correção do antifloculante recorrendo à solução de referência (900 ml de água juntamente com 100 ml de antifloculante).

3.3.3.2. Procedimento do ensaio

O ensaio de sedimentação é complementar ao da peneiração que visa determinar a granulometria dos solos, apresentando quantidades consideráveis de material fino, permitindo, assim, completar o traçado da curva granulométrica.

Como referido anteriormente, na descrição da peneiração, posteriormente à retirada da amostra da misturadora, é recomendado fazer a lavagem do material com o auxílio do peneiro de 0,063 mm. O material passado foi colocado numa base e com o auxílio de um esguicho de plástico contendo água, trespasseu-se o material para a proveta, preenchendo-a com água até aproximadamente os 800 ml.

Por outro lado, o material retido no peneiro 0,063 mm foi levado à estufa e mais tarde realizou-se a peneiração. Com este processo, o material que passou no peneiro 0,063 mm foi junto à proveta enchendo o restante da proveta até aos 1000 ml. A proveta juntamente com o material ficou em repouso cerca de 24 horas (Figura 3-8). Depois deste procedimento, foi necessário fazer as leituras do densímetro em certos intervalos de tempo juntamente com a leitura da temperatura. A acompanhar estas leituras, existia uma solução de referência que incluía 100 ml de antifloculante com 900 ml de água, em que as leituras eram realizadas nos mesmos intervalos que a solução que continha a amostra.



Figura 3-8: Aspeto do solo durante a execução do ensaio de sedimentação

3.3.4. Resultados e Análise

Analisando a curva granulométrica, representada na Figura 3-9, pode-se verificar que a amostra proveniente da mina Neves Corvo apresenta uma granulometria extensa. As dimensões das partículas variam entre 0,00 mm e os 2,00 mm sendo que 95% é representação de material fino constituída por argila e silte. A fração mais representativa é a do silte que apresenta 50%, de seguida a argila com 45% e, por fim, a fração da areia que é a menos predominante com 5%.

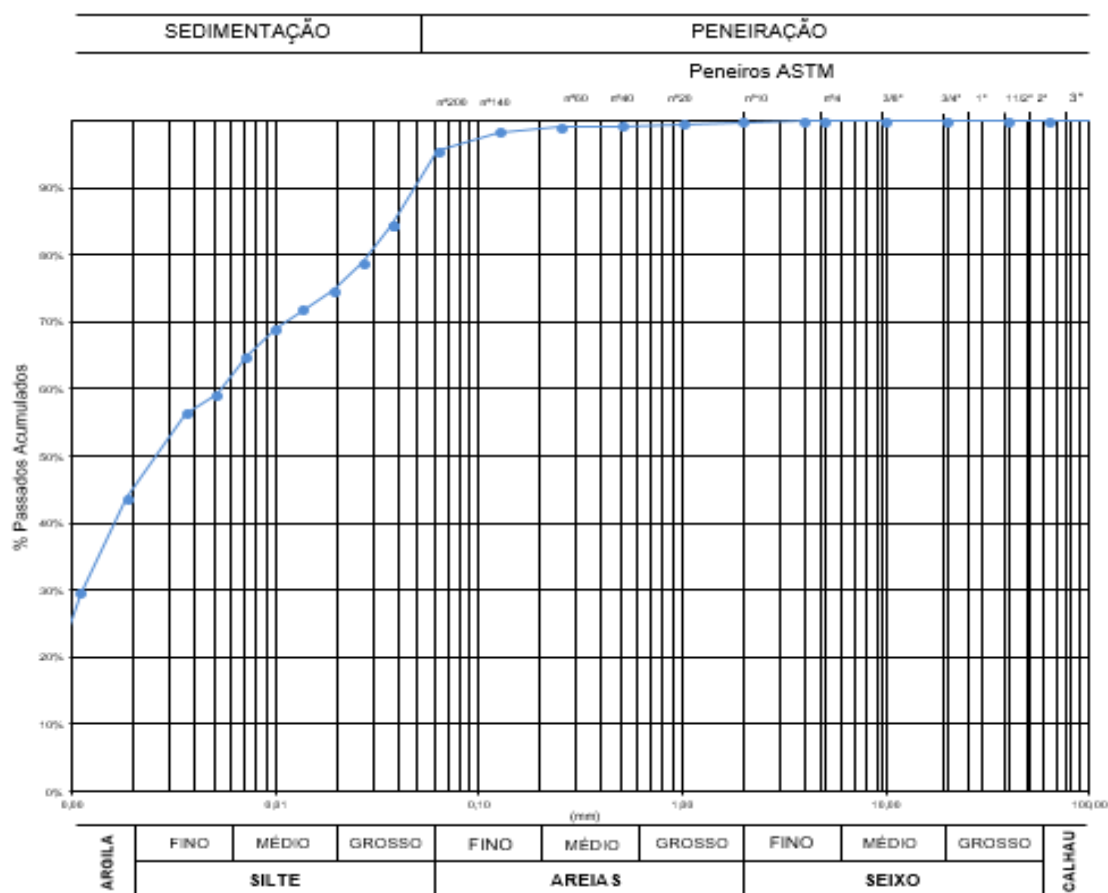


Figura 3-9: Representação da curva granulométrica da amostra ensaiada

3.4. Determinação dos limites de Atterberg

3.4.1. Introdução

Os limites de Atterberg ou de consistência são uma propriedade muito dependente do teor em água que provoca alterações no comportamento dos solos. A consistência do solo tem muita importância na geotecnia, pois permite saber de que

forma o solo comporta-se, quando está sujeito a deformações e tensões, dependendo do grau de plasticidade e resistência do solo. A quantificação dos teores em água permitem-nos caracterizar a plasticidade dos rejeitados.

O limite de liquidez (LL) de uma determinada amostra, corresponde ao teor em água relativamente a um número abaixo e acima de 25 pancadas. Este limite é obtido através da interpolação de uma reta dos valores dos provetes que relacionam os valores do teor em água com o número de pancadas.

O limite de plasticidade (LP) é relativo ao teor em água de uma amostra de solo que se encontra em estado plástico e, vai perdendo humidade, transformando a amostra num estado semi-sólido. Em suma, este limite é o teor em água abaixo do qual a amostra já não tem um comportamento moldável.

Este ensaio foi realizado de acordo com a NP 143-1969, em que as amostras utilizadas correspondem ao material passado no peneiro n.º 40. As amostras foram preparadas e o ensaio iniciou-se a partir do teor em água natural.

3.4.2. Determinação do limite de Liquidez

Para a determinação do limite de liquidez, primeiramente, foi necessário calibrar o aparelho regulando a altura de queda da concha, para uma altura aproximada de 1 cm. De seguida, colocou-se a amostra na concha com uma espessura de 1 cm e superfície nivelada. Fez-se um sulco com o riscador com uma distância de meia polegada (12,7 mm). Seguidamente, o aparelho foi acionado até as duas porções do provete, devido às pancadas, entrem em contacto e registou-se o número de pancadas obtidas. Retirou-se com a ponta da espátula, uma porção da amostra e procedeu-se à determinação do seu teor em água. O ensaio foi repetido para mais três provetes, sendo adicionada ou retirada água, manipulando o provete, de modo a que a amostra se tornasse mais ou menos fluída. Esta manipulação teve como objetivo obter um número de pancadas diferente. Por fim, levaram-se as porções retiradas à estufa e, depois disso, foram pesadas.

3.4.3. Determinação do limite de Plasticidade

Em primeiro lugar foram moldadas 4 pequenas esferas de diâmetros iguais. Rolou-se as esferas entre a palma da mão e a placa de vidro até o filamento atingir 3mm de diâmetro. De seguida, voltou-se a formar a esfera, rolando-a novamente até que com a secagem da amostra ocorresse a rutura do filamento quando este atingisse os 3 mm. Após a rutura, colocou-se os filamentos numa cápsula e pesou-se o conjunto (cápsula + provete húmido), sendo necessário saber anteriormente o peso da cápsula. Seguidamente, repetiu-se o procedimento para os outros provetes. Levaram-se os provetes à estufa até que estes estivessem secos e registou-se a sua massa. O valor deste limite é determinado através da média aritmética dos teores em água, correspondentes a cada uma das 4 subamostras.

3.4.4. Resultados e Análise

O valor do limite de liquidez é obtido através da interseção do teor em água com as 25 pancadas na reta de interpolação do gráfico representado na Figura 3-10 e, com isto, pode-se concluir que o valor deste limite é 24% como demonstra o Quadro 3-1.

Quadro 3-1: Representação dos diferentes teores em água obtidos com o limite de liquidez obtido

Provete N.º	1	2	3	4
Número de pancadas	5	8	26	27
m₁ – massa da cápsula (g)	6,64	6,64	6,47	6,47
m₂ – massa do provete húmido + cápsula (g)	30,04	30,09	31,52	29,41
m₃ – massa do provete seco + cápsula (g)	22,05	24,05	26,45	25,16
Teor em água do provete = (m₂-m₃) / (m₃-m₁) *100 (%)	51,85	34,69	25,38	22,74
LL – Limite de Liquidez (%) =	24			

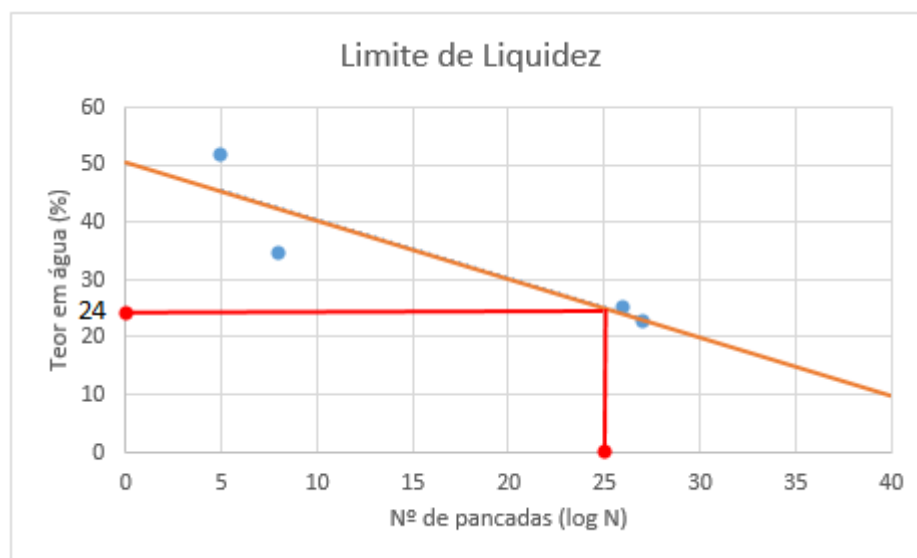


Figura 3-10: Gráfico com a representação do resultado do ensaio da determinação do Limite de Liquidez

Como referido anteriormente o limite de plasticidade é obtido através da média dos teores em água dos provetes representados no Quadro 3-2. Portanto, o valor obtido do limite de plasticidade é de 18%.

Quadro 3-2: Representação dos diferentes teores em água e limite de plasticidade obtidos

Provete N.º	1	2	3	4
m₁ – massa da cápsula (g)	6,64	6,47	6,65	6,46
m₂ – massa do provete húmido + cápsula (g)	17,15	20,17	22,45	26,83
m₃ – massa do provete seco + cápsula (g)	15,64	18,05	20,02	23,61
Teor em água do provete = (m₂-m₃) / (m₃-m₁) *100 (%)	16,78	18,31	18,18	18,78
LP - Limite de Plasticidade = valor médio (%) =	18			

O índice de plasticidade (I_p) é determinado através da diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade (expresso em percentagem) com os valores dos limites arredondados à unidade. O índice de plasticidade é calculado através da equação (3-2).

$$I_p = W_L - W_P \quad (3-2)$$

Após a substituição dos respectivos valores, o índice de plasticidade dá um valor de 6% o que significa que tem um índice de plasticidade pequeno. Desta forma, a amostra apresenta uma plasticidade pouco vincada.

3.5. Classificação dos solos de acordo com a Classificação Unificada

A classificação unificada serve como forma de completar a caracterização do material em estudo e consoante a granulometria e os limites de consistência da amostra. Esta classificação divide o solo em 15 grupos (Matos Fernandes,2006).

De acordo com a curva granulométrica, as partículas que passam no peneiro nº 200, isto é, solos finos, a percentagem de argila é superior a 50%. Como a percentagem da argila juntamente com a silte é superior aos 50%, para incorporar o solo num determinado grupo de solos finos, através das suas características de plasticidade recorre-se à Carta de Plasticidade de Casagrande representada na Figura 3-11.

Recorrendo à carta da Figura 3-11 conclui-se que o solo em estudo é classificado como CL-ML – Silte argiloso.

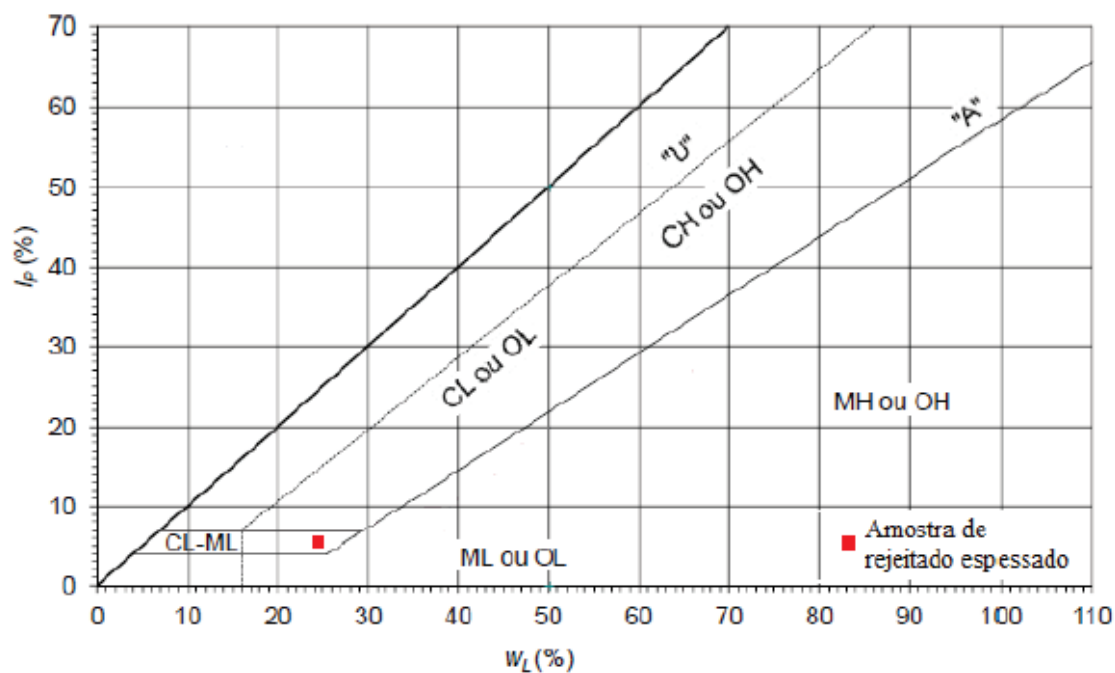


Figura 3-11: Representação na Carta de Plasticidade de Casagrande a amostra em estudo

3.6. Densidade das partículas sólidas

3.6.1. Introdução

A densidade das partículas sólidas é determinada através da relação da massa de uma amostra com o volume ocupado pelas partículas e poros dessa mesma amostra. A variabilidade desta propriedade depende do jazigo de exploração, do processo industrial de extração do minério e do método de deposição dos rejeitados (Raposo, 2016). Para a determinação desta propriedade, através da NP-83: 1965 e da norma ASTM D5550-06 (ASTM, 2006), foram utilizadas amostras com secagem prévia.

Para analisar as diferenças entre os dois métodos, foram utilizados dois rejeitados diferentes designados como A e B. As amostras A1 e B1 correspondem aos rejeitados homogeneizados. Por outro lado, as amostras A2 e B2 dizem respeito aos rejeitados em forma de grumos.

3.6.2.Determinação da densidade das partículas de acordo com a NP-83: 1965

3.6.2.1. Procedimento do ensaio

De acordo com a norma NP-83: 1965, este ensaio está dividido em duas partes. Uma das fases é relativa à calibração do picnómetro e a outra fase é relativa à determinação da densidade com ou sem secagem prévia da amostra. Este ensaio foi realizado com a amostra seca previamente. Para além disso, foi utilizado um picnómetro de 100 ml. Relativamente à calibração do picnómetro, este tem as seguintes fases:

- a) Pesar o picnómetro devidamente limpo e seco registando posteriormente a sua massa (m_1);
- b) Com recurso a água destilada encher o picnómetro até ao traço e pesar (m_2);



Figura 3-12: Picnómetro cheio com água destilada

- c) Medição da temperatura da água (t_1) e, de seguida, despejar a água destilada.

Na fase da determinação da densidade:

- d) Após a amostra ser levada à estufa, esta terá de ser arrefecida e posteriormente pesada (m_4);
- e) Sem perder material, a quantidade pesada terá de ser transferida para o picnómetro. Encher com água destilada até cerca de $\frac{3}{4}$ da capacidade do

aparelho, deixando-se embeber cerca de 12 horas como demonstra a Figura 3-13;

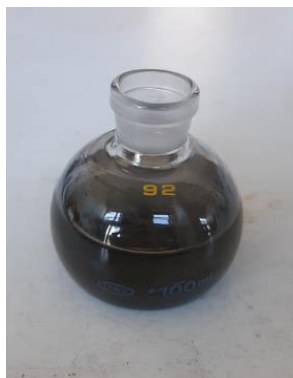


Figura 3-13: Material transferido para o picnómetro após ter sido pesado e ter-lhe sido adicionada água destilada

- f) Através da ebulição (Figura 3-14) ou agitação extrair o ar remanescente durante 10 minutos. Também pode ser utilizado um exsiccador de vácuo reduzindo progressivamente a pressão (nunca abaixo dos 100 mm Hg);



Figura 3-14: Material contendo água destilada sujeito à ebulição

- g) Se for utilizado o método da ebulição, é necessário deixar o picnómetro em repouso até este atingir a temperatura ambiente (pode-se recorrer a um exsiccador) e, posteriormente, utilizar água destilada, encher o equipamento até ao traço de referência e pesar (m_5). Depois da pesagem recorre-se a um termómetro para medir a temperatura (t_2).



Figura 3-15: Equipamento cheio com água destilada pronto a pesar

3.6.2.2. Obtenção de resultados

Para o cálculo da densidade das partículas recorreu-se à seguinte fórmula:

$$D_{20}^t = \frac{m_4}{\frac{m_2 - m_1}{\rho_{w1}} - \frac{m_5 - m_3}{\rho_{w2}}} \quad (3-3)$$

em que:

m1 - peso em gramas do provete seco;

m2 - peso em gramas do picnómetro juntamente com água destilada até ao traço de referência;

m3 - massa em gramas do picnómetro com o provete seco;

m4 - massa em gramas do provete seco;

m5 - massa em gramas do picnómetro com a amostra com água destilada até ao traço de referência;

ρ_{w1} - densidade da água à temperatura T1 (Mg/m³);

ρ_{w2} - densidade da água à temperatura T2 (Mg/m³);

Para a determinação da densidade das partículas, recorreu-se ao quadro apresentado na norma que relaciona a temperatura com a densidade. Para as temperaturas do ensaio realizaram-se interpolações.

3.6.3. Determinação da densidade das partículas de acordo com a norma ASTM D5550-06 (ASTM, 2006)

De acordo com a norma ASTM D5550-06 (ASTM, 2006), a determinação da densidade das partículas foi realizada através do método do picnómetro a gás (Figura 3-16). Este método, para além da sua eficiência e a sua simplicidade, permite a realização de vários ensaios num curto espaço de tempo, devido ao pouco tempo que é disponibilizado para cada um deles. No entanto, é necessário ter alguns cuidados na sua realização, como por exemplo o cuidado na limpeza da cápsula do aparelho, de modo a não influenciar os resultados. Para a concretização deste ensaio, é necessário que o aparelho esteja devidamente calibrado e a amostra encontre-se seca a uma temperatura de 105⁰ C. O gás utilizado no ensaio foi o hélio, pois é um gás inerte e percorre facilmente os poros da amostra.



Figura 3-16: Representação do picnómetro com hélio

Depois de ter levado a amostra à estufa num período de 24 horas e, posteriormente, deixá-la arrefecer, foi necessário primeiro ligar o aparelho e esperar cerca de 15 minutos. De seguida, retirou-se a tara do recipiente (W1) em que foi colocada a amostra e registou-se o peso. Depois disto, esse recipiente foi preenchido com a amostra e, de novo pesado (W2), de modo a obter o peso total do recipiente mais

o solo. As amostra foram ensaiadas sob forma de grumos (Figura 3-17) e homogeneizadas (Figura 3-18) para uma posterior análise entre os resultados.



Figura 3-17: Material ensaiado com grumos



Figura 3-18: Material ensaiado homogeneizado

Após a amostra colocada na câmara, foi necessário purgar (retirar as impurezas) o picnómetro, de modo a retirar todas as contaminações atmosféricas do sistema. Para tal, necessitou-se de ligar uma das extremidades da mangueira ao aparelho e a outra extremidade a um gobelé com água. Regulou-se o aparelho, de modo a sair duas bolhas por segundo. Depois da purgação, prosseguiu-se para o respetivo procedimento do ensaio em que foram fornecidas pelo aparelho duas diferentes pressões, resultantes do deslocamento do hélio. Através desta diferença de pressões foi possível calcular o volume da amostra:

$$V_s = V_c - \frac{VA}{\frac{P_1}{P_2} - 1} \quad (3-4)$$

em que:

V_s – volume da amostra (cm³);

V_c – volume da célula calibrada (cm³) não contendo amostra na célula;

VA – volume de referência (cm³);

P_1 – pressão lida após pressurização somente com a célula calibrada (psig);

P_2 – leitura da pressão, após a expansão do gás para o volume de referência adicionado.

Deste modo, foi concebível obter a densidade da amostra (SG) recorrendo à seguinte fórmula:

$$SG = \frac{w_2 - w_1}{V_s} \quad (3-5)$$

em que:

V_s – volume da amostra;

w_1 – tara da cápsula;

w_2 – tara da cápsula juntamente com o solo.

Para cada uma das amostras, foi necessário repetir o ensaio no mínimo duas vezes. No entanto, se no cálculo das densidades o erro destas for superior a 0.01 g/cm³ é fundamental partir para a terceira repetição, de forma a que o ensaio seja válido e nos seja permitido gerar uma média das três repetições para alcançar a densidade final.

3.6.4. Vantagens e desvantagens dos métodos utilizados

Existem uma série de vantagens e desvantagens a que os ensaios estão sujeitos. Quando se pretende determinar alguma propriedade, existindo diferentes métodos para a determinar, a fiabilidade do método e as suas vantagens irão prevalecer. No caso destes dois métodos estudados, o método do picnómetro com hélio é o mais eficiente, uma vez que apresenta mais vantagens como:

- A obtenção de resultados de forma mais rápida;
- A calibração do aparelho é menos demorosa.

No entanto, a nível económico, o ensaio do picnómetro com hélio é mais dispendioso, pois tem um custo inicial mais elevado pela obtenção do aparelho. Para além disso, é um ensaio que necessita de mais atenção na sua concretização e o seu funcionamento é mais complexo. Por outro lado, o picnómetro com água destilada é um instrumento relativamente barato e é um método simples, mas tem como uma das suas principais desvantagens o facto de ser de vidro e ser quebrável, desta forma durante o ensaio a termostatização tem de ser realizada de forma cuidadosa.

3.6.5. Resultados obtidos e Análise

Após a realização dos ensaios através dos diferentes métodos, pode-se observar os seguintes resultados pelas diferentes normas:

Quadro 3-3: Densidades obtidas através da norma NP-83:1965 utilizando o picnómetro com água destilada

NP-83: 1965	
Amostras	Densidade
A1	3,95
B1	4,03

Quadro 3-4: Densidades obtidas das diferentes amostras recorrendo à norma ASTM D5550-06 (ASTM, 2006) utilizando o picnómetro com hélio

ASTM D5550-06 (ASTM, 2006)	
Amostras	Densidade
A1	3,911
A2	3,943
B1	4,057
B2	4,034

Analisando os valores do Quadro 3-3 e Quadro 3-4, pode-se concluir que as densidades não têm uma variação desequilibrada, dependendo do seu método de ensaio. No entanto, de uma forma comparativa entre os métodos, verifica-se que existe uma maior aproximação das densidades quando no método do picnómetro com hélio, a amostra encontra-se sobre forma de grumos. Como existe uma diferença mínima entre as densidades, não há a necessidade de homogeneizar a amostra, pois para ser ensaiada pode-se colocá-la diretamente no picnómetro com hélio. Portanto, durante a realização desta dissertação todos os pesos específicos foram determinados, recorrendo ao picnómetro com hélio sem homogeneizar a amostra.

Após a comparação das densidades de acordo com as normas utilizadas anteriormente, para o rejeitado em estudo utilizado na reconstituição de provetes, correspondente à Mina de Neves Corvo, determinou-se a sua densidade e esta foi de 4,024.

4.Preparação de provetes para o ensaio triaxial

4.1. Introdução

A reconstituição de amostras em laboratório possibilita uma aproximação das características do material *in situ*, o que permite fazer uma caracterização dos maciços, de forma mais criteriosa. Após a deposição dos rejeitados numa barragem de contenção, os rejeitados sedimentam. Para determinar alguns parâmetros em laboratório relativos às amostras como por exemplo, a sua resistência e o pontêncial desenvolvimento de liquefação nos rejeitados, necessita-se de reconstituir provetes sujeitos a um comportamento idêntico a que está sujeito *in situ*. A preparação de amostras reconstituídas deve seguir alguns critérios dos quais se destacam:

- alcançar a densidade desejada;
- uniformidade do índice de vazios;
- saturação completa;
- não existir alteração do tamanho das partículas;
- simulação da deposição natural do solo.

A uniformidade e o controlo da densidade média dos provetes reconstituídos são os requisitos mais comuns a todos os métodos, devido ao arranjo das partículas que se quer replicar.

4.2. Técnicas utilizadas para a preparação de provetes

4.2.1. Introdução

O processo de sedimentação já foi estudado por alguns autores como Carraro e Prezzi (2007) e Corrêa (2018). Várias técnicas de preparação são utilizadas em laboratório para a reconstituição do material, contendo fins como a compactação húmida (“moist tamping”, MT), pluviação no ar (“air pluviation”, AP), a sedimentação em água (“water pluviation”, WP) e a (“slurry deposition”, SD). No entanto, para a realização de um ensaio triaxial, a reconstituição de provetes através da compactação é a técnica mais utilizada.

4.2.2. Montagem de provetes utilizando a técnica de compactação

A técnica de compactação húmida é realizada com o solo húmido que é colocado num molde em pequenas porções. Cada camada formada é compactada com um compactador até formar uma camada homogénea, como demonstra a Figura 4-1. A densidade que se pretende poderá ser controlada através do esforço realizado, durante a compactação e a quantidade de material utilizado.

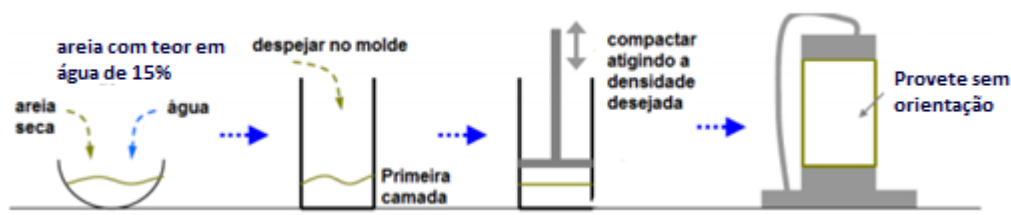


Figura 4-1: Representação ilustrativa do método MT (Sze & Yang, 2014)

4 – Preparação de provetes para o ensaio triaxial

De uma forma geral, para se iniciar a preparação de um provete através da compactação, o material utilizado é seco recorrendo a uma estufa e, posteriormente, humedecido até o seu teor em água atingir um valor de 5%. Para humedecer o rejeitado é utilizado um borrifador para que a água fique bem distribuída pela amostra. A quantidade de água a acrescentar é calculada através do seguinte método:

$$m_t = m_s * (1 + w_{pr}) \quad (4-1)$$

em que:

m_t - futura massa da amostra com a água necessária a acrescentar;

m_s - massa do solo seco (g);

w_{pr} - teor em água pretendido (%).

Para determinar m_s :

$$m_s = \frac{m_t}{1 + w_0} \quad (4-2)$$

no qual:

m_t - massa total da amostra para a realização do ensaio (g);

w_0 - teor em água inicial da amostra.

Para estipular o w_0 recorreu-se à seguinte fórmula:

$$w_0 = \frac{w - w_d}{w_d - tr} \quad (4-3)$$

em que:

w - tara da cápsula juntamente com solo húmido;

w_d - tara da cápsula com o solo seco;

tr – tara.

Após humedecer o material, este é guardado dentro de um saco de modo a que o teor em água não se altere. Posteriormente, são retiradas duas amostras em que uma

4 – Preparação de provetes para o ensaio triaxial

delas é destinada para determinar a densidade do material, e outra para que se determine o teor em água exato, no início da montagem do provete.

Em primeiro lugar, para a montagem do provete é colocada uma camada fina de uma pasta lubrificante designada como vacuum grease, de modo a que os dois discos de látex com espessura de 0.6 mm adiram à base. Desta forma, consegue-se reduzir o efeito de cintagem na base dos provetes, garantindo uma maior uniformidade das deformações radiais. De seguida, é colocada uma rodela de papel de filtro com a mesma dimensão da pedra porosa, tal como demonstra a Figura 4-2.



Figura 4-2: Aplicação dos dois discos de látex e o papel de filtro

Seguidamente, coloca-se uma membrana de látex em que a sua fixação é assegurada por anéis de borracha (o-rings) na base como demonstra a figura seguinte.



Figura 4-3: Fixação da membrana recorrendo a dois o-rings

Seguidamente, é colocado um molde metálico possibilitando a compactação do provete sem deformações. O provete contém uma abertura que possibilita através do sistema de vácuo, esticar a membrana, facilitando o processo de compactação sem a danificar. Recorrendo a um compactador, juntamente com a quantidade exata de material para cada uma das camadas, estas são compactadas, sendo que o peso de material utilizado por camada é calculado através da seguinte equação:

$$w_i = \frac{Vol G (1 + w)}{(1 + e_0)n} * \left(\frac{2 U_n (i - 1)}{1 - n} + 1 + U_n \right) \quad (4-4)$$

em que:

Vol- volume da amostra;

G- densidade das partículas sólidas;

w- teor em água da amostra;

e₀- índice de vazios pretendido;

n- número de camadas (foram utilizadas em todos os ensaios 6 camadas);

U_n- fator de sobrecompactação.

Na fase de compactação, as amostras poderão ser soltas ou densas à qual são dados parâmetros diferentes. No caso de amostras soltas é dado um *e₀* próximo de 1,4 e um fator de sobrecompactação, que quantifica o adensamento das camadas de 2%, enquanto que nas amostras densas o *e₀* é de 0,7 e o fator de sobrecompactação de 0%.

O compactador permite controlar a espessura de todas as camadas, pois contém uma alonga com batentes que proporciona uma compactação idêntica para todas as camadas. Sempre que se avança para a compactação de uma nova camada é importante riscar a superfície anterior com uma ponteira, de modo a melhorar a aderência entre camadas.



Figura 4-4: Compactação das diferentes camadas utilizando um compactador

Depois de finalizada a compactação de seis camadas, com a exposição do material à temperatura ambiente durante a compactação, existe uma diminuição do teor em água devido à evaporação. Para haver um controlo final deste teor, é retirado uma pequena amostra que é levada à estufa e, posteriormente, determinam-se todos os valores necessários para precisar este teor. Depois disso, são colocados na placa do topo dois discos de látex com auxílio ao *vacuum grease* e o papel de filtro na pedra porosa. Como o molde metálico possui um rebordo, é possível colocar a placa de topo sobre as camadas compactadas, sem aplicar qualquer carga, evitando deformações no provete e colocar, de seguida, os o-rings nas cavidades da placa. Para retirar o molde metálico, é aplicado 10 kPa de vácuo ficando o provete com o aspeto apresentado na Figura 4-5.



Figura 4-5: Aspecto final do provete após a sua montagem

O provete preparado tem 143.32 mm de altura e de diâmetro 70.28 mm.

4.2.3. Montagem de provetes utilizando outras técnicas para a sua preparação

O método de pluviação no ar (Figura 4-6) é realizado com o solo seco que é depositado, a partir de uma determinada altura, mantendo-a sempre constante. O solo é despejado num molde e a densidade produzida poderá ser ajustada, consoante a altura em que as partículas são lançadas (com maior altura maior será a densidade), de modo a alterar a energia cinética das partículas no momento de embate, na superfície de deposição.

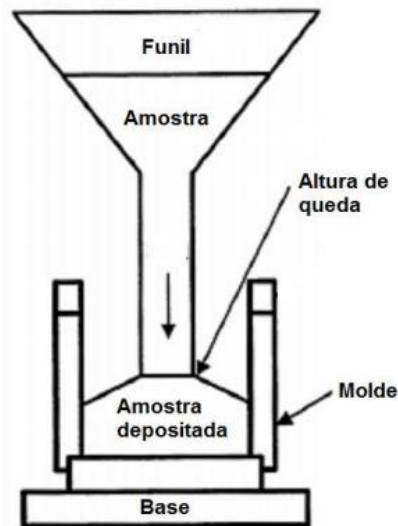


Figura 4-6: Representação ilustrativa do método AP (Wood, 2008)

O método de sedimentação em água (Figura 4-7) ocorre através da sedimentação natural utilizando água. Nesta técnica, é possível utilizar material seco ou saturado que é depositado num molde que contém água. O processo de sedimentação ocorre sob a ação da gravidade e é uma das técnicas mais utilizadas. A altura a que os solos são lançados não tem efeito na densidade do material, pois a água que está no molde, reduz por si mesma a velocidade terminal da queda.

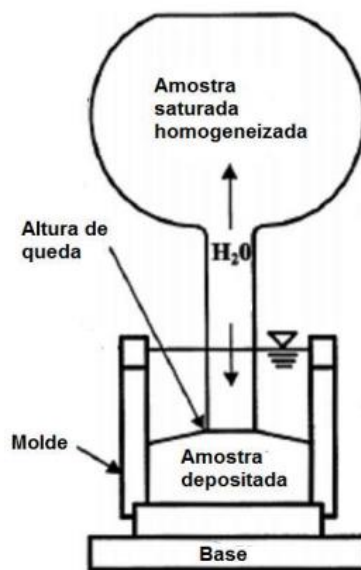


Figura 4-7: Representação ilustrativa do método WP (Wood, 2008)

Independentemente do método utilizado na reconstituição, inicialmente quando ocorre o arranjo das partículas, existem pequenas deformações que podem causar alguma instabilidade e, mais tarde, levar a grandes deformações que poderão desencadear liquefação. Wood et al. (2008) afirma que a realização de ensaios em provetes muito compactos (densidades elevadas) em ensaios não drenados, a resposta do método de reconstituição utilizado perde alguma significância. A existência de uma quantidade elevada de silte no material sedimentado, pode trazer dificuldade em estudar alguns parâmetros como o potencial de liquefação, pois as partículas de menor dimensão ocupam os espaços vazios do provete, levando a que o provete tenha um comportamento estável.

Para além destes métodos apresentados anteriormente, existe um método conhecido como SD (“slurry deposition”) que permite reconstituir provetes através da sedimentação das partículas dos rejeitados. Segundo Abreu et al. (2016), este método é o que mais se aproxima do comportamento dos rejeitados observado nos locais de armazenamento do material. O método de reconstituição de amostras SD surgiu com base no método WP. A técnica SD apresenta algumas vantagens em relação à WP como a diminuição da segregação das partículas e possibilita uma saturação inicial. Segundo Carraro e Prezzi (2007), existem outras vantagens do método SD como:

- o método permite a reconstituição de provetes homogêneos de rejeitados que contêm elevada quantidade de finos;
- reduz o nível de contrapressão necessária para completar a saturação do provete devido ao elevado grau inicial de saturação;
- elimina a necessidade da realização da percolação com dióxido de carbono.

Carraro e Prezzi (2007), apresentaram um processo de sedimentação com base no método SD com o objetivo de produzir provetes para o ensaio triaxial. O procedimento SD sugerido por Carraro e Prezzi (2007) está representado na Figura 4-8. Este método tem as seguintes fases:

- primeiramente, foi inserida uma membrana de látex em torno do cilindro da base metálica do triaxial, com os respetivos o-rings. De seguida, foi aplicado vácuo para eliminar o ar existente entre a membrana e o molde.

- seguidamente, o material após ter estado na estufa foi devidamente pesado e fechado num recipiente, em que foi sujeito a movimentos com o objetivo de ter uma maior homogeneização.
- posteriormente, recorreu-se a um tubo cilíndrico com uma rolha de borracha na sua base, colocou-se água até cerca de metade da sua altura e, de seguida, com auxílio de um funil, a mistura de solo foi derramada para dentro do tubo lentamente, de modo a minimizar a retenção de bolhas de ar. O restante espaço vazio do tubo foi preenchido com água. Selou-se o tubo com uma rolha de borracha na parte superior e girou-se em torno do seu eixo (cerca de 20 minutos).
- na base metálica do triaxial foi colocado água até à sua metade e retirou-se a rolha do tubo que contém a amostra, acrescentando o papel de filtro. De seguida, o tubo foi colocado verticalmente na base do triaxial sobre a sua pedra porosa. O papel de filtro ajudou a selar o sistema, de forma a que o tubo fosse colocado na base metálica sem existir desperdício de material. Depois, esperou-se até que a água fosse filtrada e o solo acabasse por sedimentar.
- para uma sedimentação mais eficaz foi adicionada mais água sempre que houvesse espaço no tubo.
- mais tarde, retirou-se o tubo calmamente e firmemente, de modo a que não fossem criados excessos de vibrações que danificassem o provete.
- de seguida, os excessos da amostra que estavam no molde foram retirados e, posteriormente, colocou-se a placa de topo com o respetivo papel de filtro e as rodelas da membrana de látex. Foi aplicado também os o-rings, de modo a fixar a membrana à placa de topo.
- por fim, aplicou-se vácuo na base do provete e o molde foi removido. A partir deste ponto todas as etapas foram executadas, de acordo com o procedimento do ensaio triaxial.

4 – Preparação de provetes para o ensaio triaxial

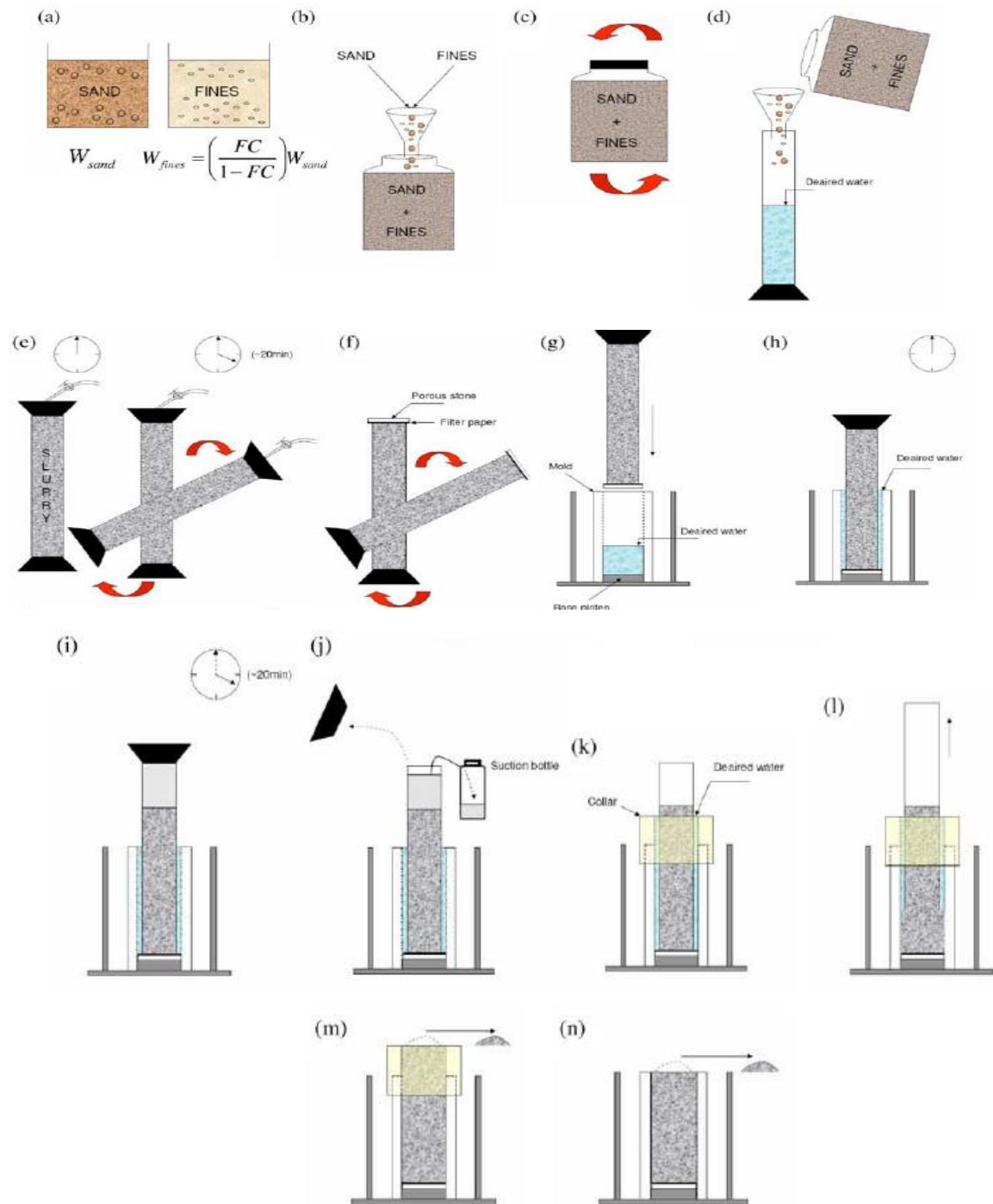


Figura 4-8: Representação esquemática do método de reconstituição proposto de solos contendo finos (Carraro e Prezzi, 2007)

Com o objetivo de estudar o potencial de liquefação em provetes sujeitos a ensaios triaxiais, Corrêa (2018) recorreu ao método desenvolvido por Carraro e Prezzi (2007) com algumas modificações, de forma a reconstituir provetes.

4 – Preparação de provetes para o ensaio triaxial

Para o método SD, Corrêa (2018) colocou a pedra porosa e o papel de filtro sobre o cilindro invertido que continha os rejeitados. Seguidamente, fixou a membrana de látex ao pedestal com os o-rings e com o pedestal invertido encaixou a membrana pela parte de fora do cilindro. De seguida, ainda com o conjunto do cilindro e o pedestal invertidos, foi inserido o molde metálico (Figura 4-9). Posteriormente, todo equipamento foi agitado e o cilindro sofreu leves batidas de modo a soltar o material que ficou fixo nas suas laterais. Após a amostra encontrar-se homogênea o sistema retomou à posição normal da base triaxial. Por fim, a membrana foi dobrada sobre a parte superior do molde metálico (Figura 4-10) e o vácuo foi ligado de modo a que a membrana ficasse justa à parede interna do molde.



Figura 4-9: Montagem do método de reconstituição de amostras segundo Corrêa (2018)



Figura 4-10: Sedimentação dos rejeitados para a reconstituição de provetes segundo Corrêa (2018)

4.3. Técnica desenvolvida para a reconstituição de provetes por sedimentação

De modo a reproduzir o processo de sedimentação, pensou-se num mecanismo para reconstituir provetes através da sedimentação natural. Para esta reconstituição foi necessário fazer uma série de tentativas até chegar à técnica final. Inicialmente, o equipamento que foi desenvolvido encontra-se representado na Figura 4-11. Este equipamento foi constituído por dois tubos metálicos e dois anéis de contenção, de forma a auxiliarem a selagem dos tubos. 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. O equipamento permitiu recriar provetes com as dimensões de 69,0 mm de diâmetro e 144,0 mm de altura.



Figura 4-11: Mecanismo inicial para reconstituição de provetes

Esta técnica não funcionou da forma esperada, pois houve fugas de água pelas juntas do tubo superior. Para além disso, não houve um escoamento da água como esperado, que impediu o processo de sedimentação, como indica a Figura 4-12.



Figura 4-12: Aspeto final do material resultante da primeira tentativa de reconstituição de provetes

De forma a melhorar esta técnica, o equipamento sofreu algumas alterações. Primeiramente, retirou-se a base e o topo metálico juntamente com os esticadores, pois este conjunto criou uma selagem do equipamento e não permitiu o escoamento da água na base do equipamento. O tubo superior também foi alterado, de modo a que não houvesse fugas de água (Figura 4-13).



Figura 4-13: Preparação da segunda tentativa de reconstituição de provetes

Para colocar os rejeitados recorreu-se a uma mangueira e a um funil como demonstra a Figura 4-14. O material foi depositado, lentamente, de modo a que não houvesse a criação de bolhas de ar.



Figura 4-14: Colocação da mangueira e de um funil para depositar os rejeitados

4 – Preparação de provetes para o ensaio triaxial

Após alguns dias a sedimentar, desmontou-se o equipamento e o provete estava com o aspeto representado na Figura 4-15.



Figura 4-15: Aspeto do provete resultante da segunda tentativa de reconstituição

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 (Figura 4-16). De seguida, o equipamento foi colocado numa bancada para iniciar-se a drenagem da água.



Figura 4-16: Preparação do método final de reconstituição de provetes

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 e o provete ficou com o aspeto demonstrado na Figura 4-17.



Figura 4-17: Aspeto do provete após ter sido retirado 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

4 – Preparação de provetes para o ensaio triaxial

furar com as partículas (Figura 4-18). A limpeza da membrana é necessária para que os o-rings consigam vedar e não haja nenhuma fuga.



Figura 4-18: Remoção dos excessos de material sedimentado e regularização do topo do provete

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 seguinte:



Figura 4-19: Aspeto final do provete reconstituído

Este método de reconstituição, teve uma série de dificuldades pois, nem sempre foi possível reconstituir um provete para avançar para a realização de ensaios triaxiais. Geralmente, a causa mais habitual que não tornou possível esta reconstituição foram os pequenos furos que surgiram na membrana. Os furos ocorreram maioritariamente na parte superior e inferior da 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 com a junção do tubo superior com o molde metálico através de alguma saliência existente, a membrana furou.

No entanto, verificou-se que qualquer que seja o método utilizado para a reconstituição de provetes através da sedimentação, este é um processo bastante complexo. Existem alguns problemas tais como a rotura da membrana, segregação e introdução de danos na amostra que fazem com que o processo de reconstituição seja difícil e moroso.

5. Determinação da permeabilidade no ensaio triaxial

5.1. Introdução

Neste capítulo, pretende-se descrever o equipamento triaxial e o procedimento para realização deste ensaio. Para além disso, pretende-se estudar a diminuição no caudal percolado durante a realização de ensaios triaxiais, causado pelo estrangulamento devido à redução de diâmetro das pedras porosas. De forma a obter um fator, que corrija as diferenças obtidas na determinação da permeabilidade, devido aos diferentes caudais, recorreu-se ao software Geostudio 2012.

É importante referir que no software foram introduzidos dois modelos que representam os provetes utilizados nos ensaios, em que ambos apresentam as mesmas características de material, permeabilidade e condições de fronteira. No entanto, um dos modelos corresponde a um provete com o diâmetro das pedras porosas inferior ao diâmetro do provete e outro modelo com ambos os diâmetros iguais. Desta forma e, de acordo com a lei de Darcy (1856) foi estabelecida uma comparação entre o caudal obtido segundo esta teoria e os caudais conseguidos no software.

5.2. Descrição geral do equipamento triaxial

O ensaio triaxial tem como objetivo a caracterização mecânica dos solos através da resistência ao corte e da determinação do comportamento das amostras em condições drenadas e não drenadas.

Para a concretização deste ensaio foi necessário recorrer a uma câmara triaxial, a um computador com o software “TruePath Triaxial Test System”, para que os dados ficassem registados e fosse possível a alteração e introdução de alguns parâmetros do ensaio. Para além destes equipamentos, foi necessário recorrer a uma unidade de aplicação de carga que permitiu a realização do corte e os controladores de pressão/volume designados como “back pressure e cell pressure”, que permitiram a regulação das pressões proporcionando as condições necessárias para o ensaio.



Figura 5-1: Representação do equipamento triaxial

Para iniciar um ensaio triaxial é necessário proceder à sua preparação prévia. Esta preparação consiste em verificar o estado de funcionamento do equipamento, devendo-se testar os transdutores e verificar o seu fator de calibração. De modo a facilitar a execução do ensaio é necessário ter algum material preparado tais como:

- quatro rodelas de membrana cortadas;
- uma membrana impermeável para envolver o provete;
- preparar duas rodelas de papel de filtro com o diâmetro das pedras porosas;

- preparar quatro o-rings para a selagem da membrana que cobre a amostra na base e no topo.

Antes de iniciar a montagem do provete e depois da sua montagem, deve-se limpar bem o pedestal para que durante ensaio não ocorram fugas.

5.3. Execução do ensaio triaxial

Após a preparação da amostra, esta foi colocada na câmara triaxial. Após o fecho da câmara, o pistão foi baixado calmamente, encostando-o ao topo do provete e bloqueado. A câmara foi preenchida com “água desaerada”. Para encher a célula a câmara foi ventilada. Depois da câmara devidamente cheia retirou-se a torneira com ligação ao depósito e, por fim, o vácuo. Posteriormente, iniciou-se o ensaio triaxial que foi realizado em quatro fases: percolação (CO_2 e H_2O), saturação, consolidação e o corte, que serão apresentadas de seguida.

Em primeiro lugar, percolou-se 1,5 litros de CO_2 ocorrendo a percolação com água desareada tendo como objetivo expulsar o ar que estava entre as partículas do provete e, assim, preencher os vazios com água. A percolação foi aplicada de forma ascendente, isto é, aplicada na base da amostra terminando no seu topo. Para o processo de percolação com CO_2 , foi colocado num balde com água, uma garrafa invertida cheia com 1,5 litros de água e ligou-se um tubo ao topo, em que uma das suas extremidades foi posta dentro da garrafa. O processo iniciou com o CO_2 ligado à base do provete, com um fluxo de 4 a 5 bolhas por segundo, dando por terminado quando não houvesse água dentro da garrafa. De seguida, para a percolação com água foi ligado à base o depósito da água que estava posicionado cerca de 1 m acima da base do provete, e, no topo, um tubo com saída para um goblé para onde saiu água. Este processo acabou quando no tubo saiu água sem bolhas de ar.

Após a percolação, iniciou-se a fase de saturação, cujo objetivo é dissolver na água o ar que não tenha sido removido durante a percolação. A percolação foi executada através da aplicação de pressões neutras, ou intersticiais, gradualmente crescentes, mantendo a tensão efetiva constante (Rocha, 2010). Nesta fase foi adotada uma tensão efetiva (diferença entre CP e BP) constante para todos os ensaios, com um valor de 15 kPa. Nesta fase há que ter em atenção as pressões, de modo a que a contrapressão nunca

seja superior à pressão aplicada no exterior do provete, para a amostra não sofrer alterações de volume. A saturação deu-se por terminada quando o parâmetro B de Skempton estava superior a 0,95. Para a determinação deste parâmetro foram impostos no ensaio incrementos de contrapressão em BP e de pressão em CP. Para além disso, foi registada a diferença correspondente a Δu (pressão intersticial) em condições não drenadas e $\Delta\sigma_3$ correspondente ao valor do incremento de tensão de consolidação isotrópica na câmara. Este parâmetro define-se como:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_3} \quad (5-1)$$

Posteriormente, ocorreu a fase de consolidação em que o provete sofreu uma compressão gradual, acabando por consolidar-se isotropicamente. Nesta etapa foi incrementada uma pressão em CP, mantendo constante o valor da contrapressão em BP. No início da fase, a pressão de confinamento foi crescente ao longo de uma rampa linear. Assim sendo, deu-se como terminada a consolidação, quando já não existia variações volumétricas no provete.

Por último, sucedeu-se a fase de corte e levou-se a amostra à rutura por compressão axial. No caso do ensaio ser não drenado, as torneiras de drenagem na base e do topo da amostra mantêm-se fechadas, caso seja drenado, as torneiras de drenagem mantêm-se abertas. O corte realizou-se através de um movimento ascendente da câmara. Este movimento levou à junção da amostra com o êmbolo que permaneceu estático, aplicando uma força na amostra. De modo a não gerar excessos de pressão neutra no provete, este movimento foi lento a uma velocidade de 0,01 mm/min.

Depois destas fases concretizadas, procedeu-se ao bloqueamento do pistão. De seguida, baixou-se a prensa e retirou-se a água que estava dentro da câmara. Seguidamente, o pedestal juntamente com o provete foram congelados (Figura 5-2). Por fim, foram levados à estufa dois tabuleiros em que um deles continha a amostra e, o outro, continha o material oriundo da lavagem da membrana, das rodela da membrana, dos o-rings e da base e topo do pedestal. Após 24 horas na estufa, os tabuleiros foram retirados e registou-se os diferentes pesos para a determinação do teor em água.



Figura 5-2: Aspecto final do provete após a sua congelação

5.4. Permeabilidade

5.4.1.Introdução

A permeabilidade de um determinado solo é um dos parâmetros físicos e mecânicos mais importantes a ter em consideração nas obras de engenharia civil. Esta propriedade reflete a maior ou menor facilidade da percolação da água, através dos poros do solo (Reis, 2017). O coeficiente de permeabilidade tem várias ordens de grandeza para diferentes solos, como demonstra o Quadro 5-1.

Quadro 5-1: Valores do Coeficiente de Permeabilidade (Matos Fernandes, 2006)

Tipo de solo	k (m/s)
Cascalhos limpos	$> 10^{-2}$
Areia grossa	10^{-2} a 10^{-3}
Areia média	10^{-3} a 10^{-4}
Areia fina	10^{-4} a 10^{-5}
Areia siltosa	10^{-5} a 10^{-6}
Siltes	10^{-6} a 10^{-8}
Argilas	$< 10^{-8}$

É possível efetuar uma classificação de acordo com a permeabilidade obtida para um determinado solo. A classificação está representada no Quadro 5-2.

Quadro 5-2: Classificação dos solos quanto à sua permeabilidade (Terzaghi & Peck, 1967)

Grau de permeabilidade	k (m/s)
Alto	$>10^{-3}$
Médio	10^{-3} a 10^{-5}
Baixo	10^{-5} a 10^{-7}
Muito baixo	10^{-7} a 10^{-10}
Praticamente impermeável	$<10^{-9}$

A permeabilidade apresenta uma grande variação e depende do fluido que percorre o solo como também das suas propriedades inclusive a sua viscosidade. Quanto menor for a viscosidade, maior será a capacidade do fluido em atravessar o solo. Por sua vez, a temperatura a que o fluido se encontra, influencia esta propriedade (Cerqueira, 2016). Quanto maior for a temperatura, menor a viscosidade do fluido e consequentemente a permeabilidade aumenta. A granulometria é a propriedade mais relevante para a permeabilidade (Matos Fernandes, 2006). Para além disso, segundo Matos Fernandes (2006), existem outros fatores como o índice de vazios, a composição mineralógica, o grau de saturação e a estrutura do solo que influenciam a permeabilidade.

Para uma avaliação do coeficiente de permeabilidade de solos arenosos podem ser utilizadas expressões semiempíricas (Matos Fernandes, 2006). “Hazen (1892; 1930), propôs a proporcionalidade de K em relação ao quadrado de D_{10} , designado como diâmetro efetivo do solo (Matos Fernandes, 2006)”. Esta proporcionalidade, está representada na equação (5-2).

$$K = C \cdot D_{10}^2 \quad (5-2)$$

Em que C tem um valor na ordem de 10000.

No entanto, como a equação (5-2) apenas tem em consideração a dimensão das partículas, a sua utilidade é muito reduzida. No entanto, existem outras equações que permitem avaliar o coeficiente de permeabilidade como, a equação de Konezy-Carman. Esta equação tem um fundamento mais elaborado pois incorpora parâmetros relativos ao fluido, ao meio poroso e a um coeficiente empírico dependente da forma das partículas. Para uma temperatura da água a 20°C, a equação de Konezy-Carman é representada pela equação (5-3).

$$K = 2 \cdot 10^6 \left(\frac{1^2}{S_0^2} \right) \cdot \frac{e}{1 + e} \quad (5-3)$$

Nesta equação, e representa o índice de vazios e S_0 , é relativo à superfície exterior das partículas por unidade de volume que pode ser obtido através da equação (5-4).

$$S_0 = SF \sum_{i=1}^n \frac{f_i}{D_{i,M}^{0,595} \cdot D_{i,m}^{0,405}} \quad (5-4)$$

em que:

f_i - é a percentagem de partículas entre dois peneiros consecutivos no troço genérico i da curva granulométrica, admitida como linear entre aqueles peneiros;

$D_{i,M}$ e $D_{i,m}$ - representam, respetivamente, o maior diâmetro e o menor diâmetro (expressos em metros) no troço genérico i da curva granulométrica entre dois peneiros consecutivos;

SF - é um fator adimensional dependente da forma das partículas e que tipicamente se situa no intervalo 6 a 8, sendo o limite inferior aplicável a partículas esféricas e o limite superior a partículas angulosas.

O índice de vazios é outra propriedade que causa uma grande influência na permeabilidade de um solo pois, quanto maior for este índice, maior será o volume de vazios e portanto, maior será a sua permeabilidade. Para além disto, a estrutura natural do solo afeta este parâmetro visto que, os solos podem possuir diferentes valores de permeabilidade para a direção vertical e horizontal (Cerqueira, 2016). As bolhas de ar existentes no solo também têm influência na permeabilidade pois, dificultam a movimentação da água reduzindo esta propriedade conforme mostra a Figura 5-3. Por esta razão, segundo Souza (2016), para o mesmo solo, quanto maior for o grau de saturação de um solo, maior será a sua permeabilidade.

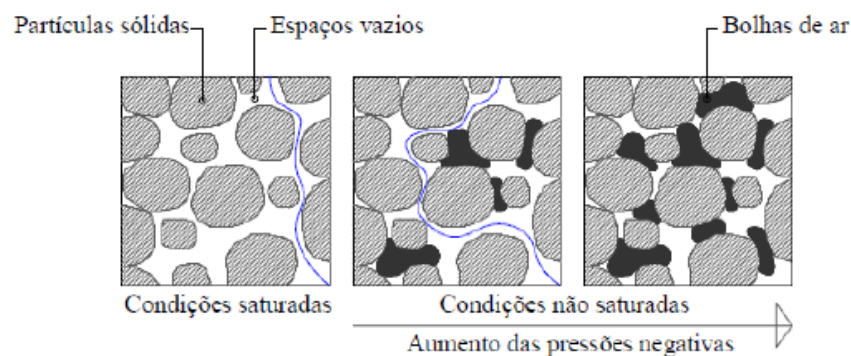


Figura 5-3: Alteração da permeabilidade com o grau de saturação (Reis, 2017)

Como referido anteriormente, a composição mineralógica também afeta a permeabilidade de um determinado solo pois, o movimento da água passa a depender de outras forças como as eletroquímicas para além da gravidade (Matos Fernandes, 2006).

Quando uma partícula de água se desloca ao longo de uma trajetória como por exemplo, entre o ponto 1 e 2 representados na Figura 5-4, essa trajetória designa-se por linha de fluxo (Matos Fernandes, 2006). Se forem instalados tubos piezométricos nos pontos 1e 2, o nível da água aumenta e, a altura entre a base do tubo até ao nível que a água atinge, chama-se de altura piezométrica (h_w).

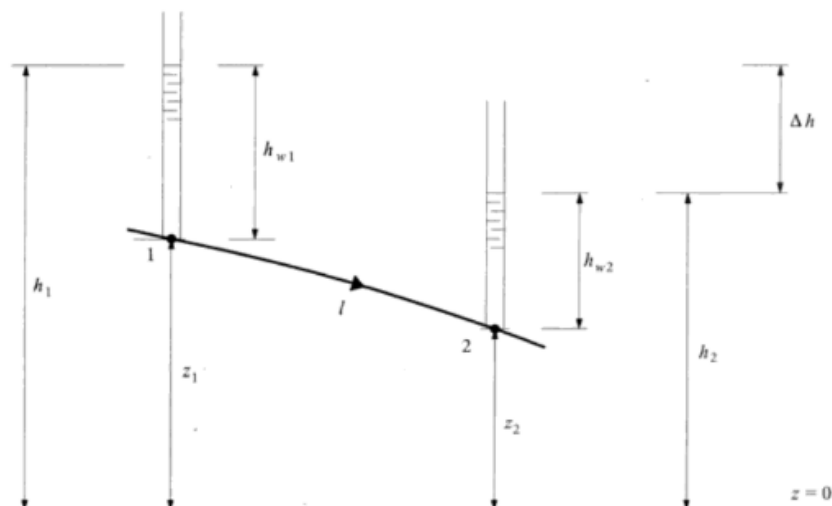


Figura 5-4: Movimento de uma partícula de água num maciço terroso (Matos Fernandes, 2006)

Segundo Matos Fernandes (2006), a altura do ponto, z , representado na Figura 5-4, acima de um plano de referência denomina-se por cota geométrica. A soma da altura piezométrica com a cota geométrica designa-se como cota piezométrica como demonstra a equação (5-5).

$$h = z + h_w \quad (5-5)$$

Segundo (Matos Fernandes, 2006), a cota piezométrica é relativa à energia potencial da água por unidade de peso em cada ponto. A variável z , representa a energia potencial enquanto que, a variável h_w está relacionada com o estado de compressão a que a água está sujeita, sendo determinada como demonstra a equação (5-6).

$$h_w = \frac{u}{\gamma_w} \quad (5-6)$$

Como a velocidade de percolação da água num maciço terroso é muito reduzida, por consequência a energia cinética é muito baixa e por isso pode ser desprezada. Por consequente, a energia potencial é idêntica à energia mecânica total, isto é, à carga hidráulica (Matos Fernandes, 2006). Portanto, pode-se considerar:

$$\Delta h = h_1 - h_2 \quad (5-7)$$

em que Δh representa a perda de carga hidráulica.

Relacionando com a equação (5-5), obtém-se a fórmula representada pela equação (5-8).

$$\Delta h = (z_1 - z_2) + (h_{w1} - h_{w2}) \quad (5-8)$$

A razão da perda de carga entre os pontos 1 e 2 com uma determinada distância, l , corresponde ao gradiente hidráulico, representado pela equação (5-9).

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (5-9)$$

Segundo (Matos Fernandes, 2006), a lei de Darcy (1856) é a lei que rege o movimento da água num meio terroso. Esta lei foi deduzida com um dispositivo idêntico ao representado na Figura 5-5 em que, foi estabelecido um regime permanente por uma colocação de diferentes cargas hidráulicas entre o ponto 1 e 4. Após algumas experiências com resultados diferentes do comprimento da amostra, L , e da carga total, h_1 e h_4 , determinando o caudal em cada uma das experiências, Darcy concluiu que o caudal é diretamente proporcional à perda de carga e inversamente proporcional ao

comprimento (Matos Fernandes, 2006). Assim sendo, pode-se retratar o caudal como demonstra a equação (5-10).

$$Q = K \frac{h_1 - h_4}{L} S \quad (5-10)$$

em que:

S - é a área da secção transversal da amostra;

K - é a constante de proporcionalidade.

Tendo em consideração que $h_1 - h_4 = h_2 - h_3$ e que $\frac{h_1 - h_4}{L}$ representa o gradiente hidráulico, pode-se representar o caudal como descreve a equação (5-11).

$$Q = K \cdot i \cdot S \quad (5-11)$$

em que:

K - coeficiente de permeabilidade;

i - gradiente hidráulico;

S - área da secção transversal do solo.

Ou então pode se escrever:

$$v = \frac{Q}{S} = ki \quad (5-12)$$

em que v representa a velocidade de escoamento. O coeficiente de permeabilidade tem as dimensões de uma velocidade sendo assim expresso em m/s. No entanto, a velocidade representada na lei de Darcy é uma velocidade macroscópica. Durante a percolação de água num maciço, a água apenas atravessa uma fração da área S igual a nS do qual n é a porosidade do solo, a trajetória da água é bastante sinuosa durante a sua passagem pelos poros do solo, as partículas de água têm grandes variações de velocidade dependendo dos estrangulamentos e alargamentos dos canículos formados pelos poros. Por isso, denota-se que v é derivado de uma divisão entre o caudal estimado por a secção total do solo, considerando uma trajetória linearizada fictícia (Matos Fernandes, 2006).

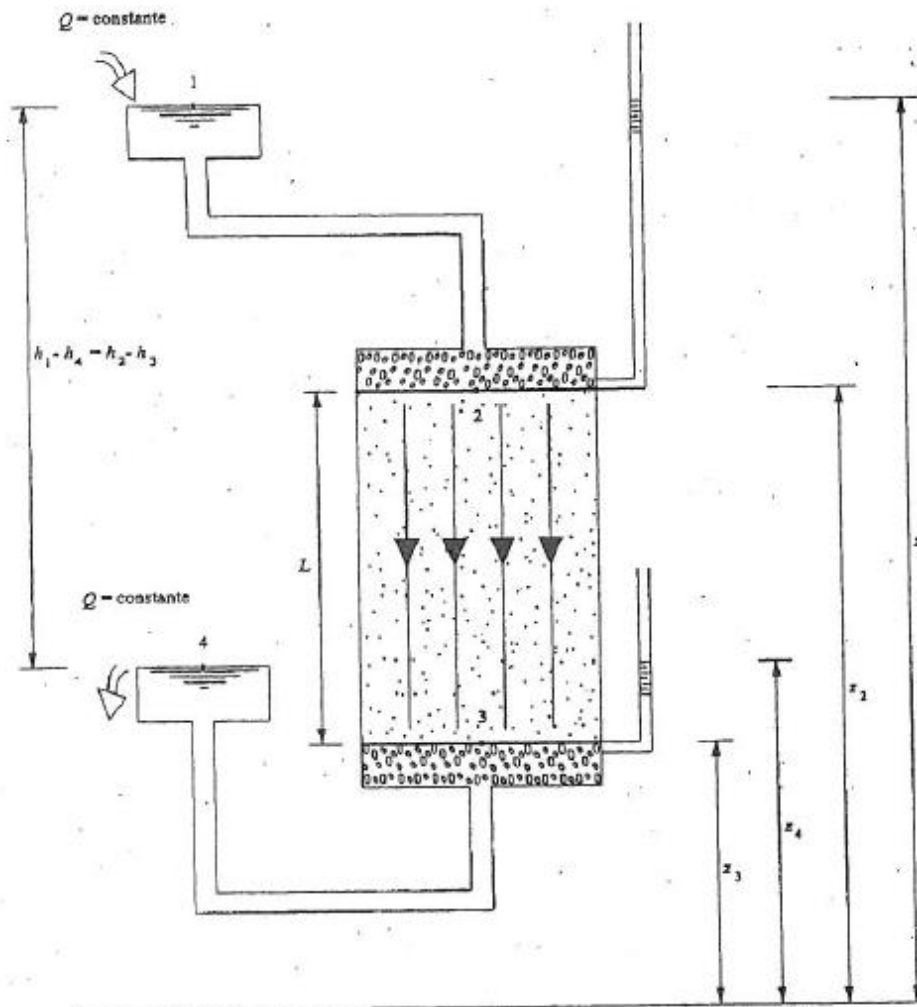


Figura 5-5: Experiência de Darcy (Matos Fernandes, 2006)

5.4.2. Determinação da permeabilidade durante a realização de ensaios triaxiais

Após a preparação da amostra, o enchimento da câmara triaxial com água e a percolação com o CO₂, inicia-se a fase de percolação com água. Esta fase dá-se por terminada quando, pelo canal do pedestal que faz ligação ao topo da amostra por onde sai a água percolada, a água sair sem bolhas de ar como referido no ponto 5.3. O canal por onde sai a água percolada está representado com o número 1 na Figura 5-6.

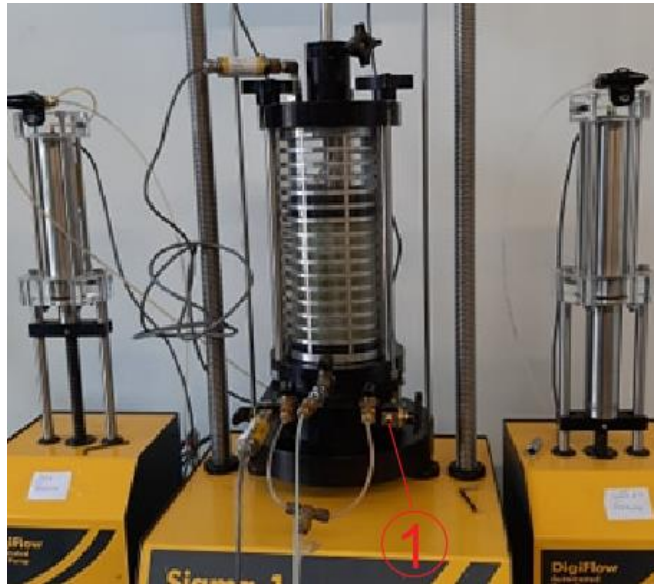


Figura 5-6: Representação do canal de topo no pedestal por onde sai a água percolada na fase de percolação com água

Sendo certo que a determinação da permeabilidade deve ser realizada depois da fase de saturação, é possível efetuar uma estimativa deste parâmetro no final da fase de percolação. Embora na fase de percolação o provete possa não estar completamente saturado, a determinação da permeabilidade nesse instante é consideravelmente mais simples e menos exigente em termos de equipamento. O processo inicia-se através da circulação de água dentro do provete num certo intervalo de tempo, isto é, é imposto ao provete um gradiente de pressão neutra durante um determinado período. No início e no fim do intervalo, são registados os respetivos volumes representados no software como volume de BP. A diferença de volumes inicial e final fornece o volume necessário para a equação (5-13). Para além disso, o software permite determinar a pressão intersticial necessária para o cálculo da permeabilidade do provete. A pressão intersticial é obtida através do sensor ligado à base do pedestal representado pelo número 1 da Figura 5-7.

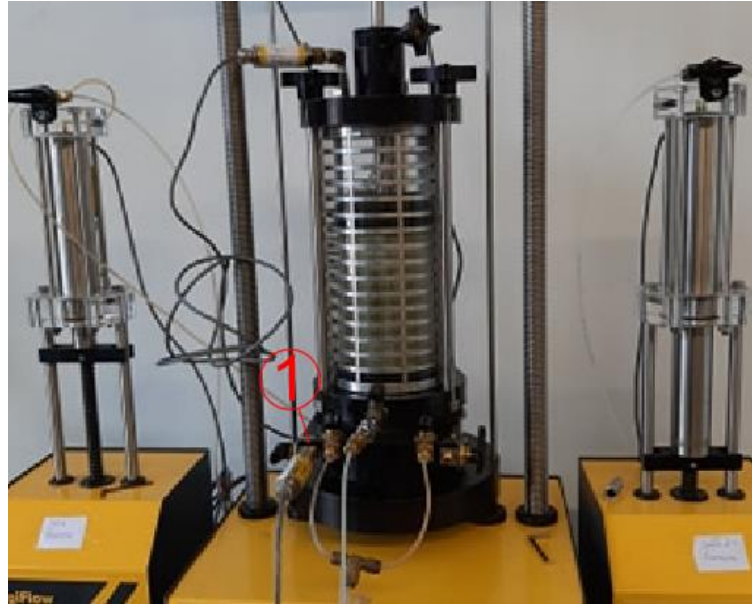


Figura 5-7: Representação do sensor de pressão que permite obter a pressão intersticial

Para a determinação desta propriedade, é necessário ligar os tubos de drenagem da bomba BP ao pedestal e colocar uma pressão neutra. Os tubos de drenagem estão representados na Figura 5-8 e as suas ligações ao pedestal estão retratadas pelos números 3 e 5 dessa mesma figura. Após girar a válvula da bomba BP (representada na Figura 5-8 pelo número 1) na direção do tubo de drenagem, abre-se as torneiras do pedestal (números 3 e 5) para que o provete fique sujeito à pressão imposta e, coloca-se um recipiente na torneira do topo do provete, caracteriza pelo número 6 da Figura 5-8, de forma a reter a água que sai.



Figura 5-8: Enumeração de todas as válvulas intervenientes durante a realização de um ensaio triaxial

Para não ocorrer erros no sistema nem no cálculo dos volumes, é necessário não haver ar nas bombas, nos transdutores de pressão e nos tubos que ligam as bombas ao pedestal.

Durante a realização de ensaios triaxiais, no decorrer da determinação da permeabilidade, observou-se que, a água após ser percolada ao longo da amostra e sair pelo pedestal através do tubo número 6 da Figura 5-8, encontra-se com uma cor alaranjada. Por isso, existem algumas partículas mais finas que são movidas pela água e que acabam por se dissolverem, como demonstra a Figura 5-9.

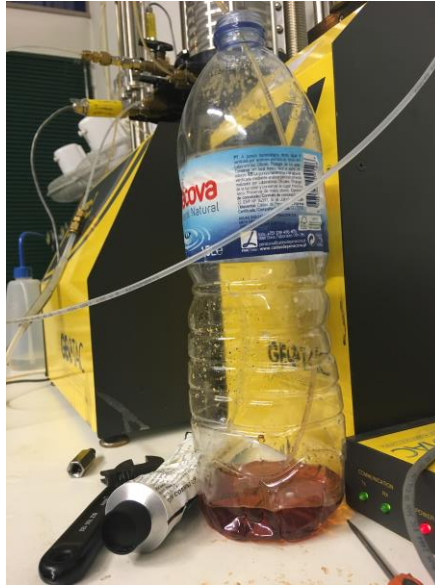


Figura 5-9: Água percolada com cor alaranjada durante a determinação da permeabilidade

Para caracterizar a permeabilidade é utilizado o seu coeficiente k . Este parâmetro é estimado através da seguinte equação:

$$K = \frac{Vl}{t\Delta hS} \quad (5-13)$$

em que:

t - intervalo de tempo no qual circula um volume de água;

V - volume de água que atravessa a amostra;

S - área da secção transversal da amostra;

l - altura do provete;

Δh - valor da carga hidráulica.

5.4.3. Avaliação do efeito das pedras porosas

Durante a realização de um ensaio triaxial, existem equipamentos em que, as suas pedras porosas tem um diâmetro igual ao do provete, no entanto, em outros equipamentos, o diâmetro das pedras porosas é inferior ao do provete, como representado na Figura 5-10. No caso de o diâmetro das pedras porosas ser inferior, existe uma redução de caudal devido ao estrangulamento causado pela redução do

diâmetro. Durante a realização de ensaios triaxiais no laboratório da ESTGV, visto que o diâmetro das pedras porosas é inferior ao diâmetro dos provetes, foram colocados na base e no topo do provete dois discos de látex, entre os quais colocou-se uma camada fina de pasta lubrificante (*vacuum grease*). A utilização dos discos de látex, tem como principal objetivo reduzir o efeito de cintagem na base e no topo do provete.



Figura 5-10: Representação do diâmetro das pedras porosas na base e topo do pedestal

Com o objetivo de comparar o caudal obtido pela teoria representada pela lei de Darcy e um modelo desenvolvido por um software, recorreu-se ao módulo SEEP/W, pertencente ao software Geostudio 2012. O software gera modelos correspondentes a cenários complexos e proporciona a análise de problemas geotécnicos diversos. O método de elementos finitos, é utilizado para modelar as características mecânicas e hidráulicas de estruturas e terrenos. Este método divide um meio contínuo em uma malha de elementos simples com a dimensão pretendida sendo que, no caso em estudo, a malha foi definida com 0,005m. Este módulo possibilitou modelar o movimento e distribuição de água dentro de materiais porosos. Para além disso, o software permitiu estudar a influência que o estrangulamento tem sobre o caudal percolado. Para isto, foi necessário inserir algumas características relativas ao provete e ao material que o constitui como, a sua permeabilidade e a anisotropia.

Em regra geral, os solos apresentam um comportamento anisotrópico. Este termo está associado às diferentes propriedades que o solo apresenta em cada direção e tem influência sobre o caudal percolado. Durante a sedimentação, as partículas de um solo têm tendência a dispor-se com a sua maior dimensão na direção horizontal, devido ao peso dos sucessivos estratos que encontram-se sobre os inferiores, facilitando a circulação de água nesta direção (Matos Fernandes, 2006). Assim sendo, o caudal que é percolado entre as partículas tem uma trajetória mais encurvada na direção vertical do que na direção horizontal como demonstra a Figura 5-11. Por isto, a permeabilidade não é uniforme em todas as direções havendo assim uma anisotropia da permeabilidade. Segundo Serra (2009), devido à anisotropia, a permeabilidade horizontal (k_h) é geralmente superior à permeabilidade vertical (k_v).

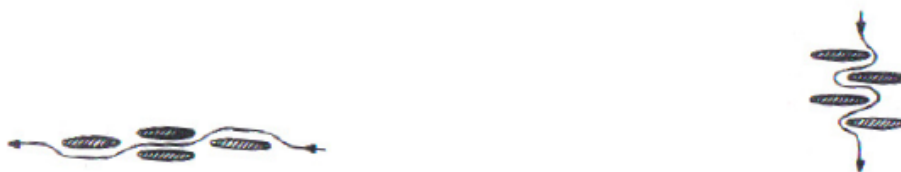


Figura 5-11: Sinuosidade dos caminhos a percorrer pela água: a) Direção horizontal; b) direção vertical (Serra, 2009)

A anisotropia é representada pelo quociente entre a permeabilidade horizontal e a permeabilidade vertical como demonstra a seguinte equação:

$$r_K = \frac{k_h}{k_v} \quad (5-14)$$

De forma a obter os diferentes caudais no software, primeiramente, inseriu-se uma geometria axissimétrica de um provete de um ensaio triaxial com as dimensões apresentadas na Figura 5-12. De seguida, definiu-se as características do material que constitui o provete com uma permeabilidade de $1,0E^{-7}$ m/s. Por fim, foram colocadas as condições de fronteira, incluindo as respetivas cotas piezométricas superior e inferior e o sentido do fluxo. Após estes três passos, é possível analisar o caudal percolado, os

campos do gradiente hidráulico e a velocidade de percolação (Reis, 2017). O provete estudado tem de altura 0,143 m e 0,07 m de largura. No entanto, como o modelo representado no software é axissimétrico, foi inserido uma altura de 0,143 m e uma largura do provete de 0,035 m enquanto que, a pedra porosa com diâmetro inferior ao provete apresenta uma largura de 0,0165 m como demonstra a Figura 5-12. Relativamente às condições de fronteira, foram colocadas alturas piezométricas de 2 m na base e 1 m no topo, representadas a azul e amarelo respetivamente. Para além destas condições, foi adicionada uma fronteira impermeável, que se encontra representada a vermelho na Figura 5-12. No software foram desenhados 6 modelos em que 3 correspondem a um diâmetro das pedras porosas igual ao do provete e, os restantes modelos com o diâmetro das pedras porosas inferior ao provete. Estes 6 modelos, foram divididos em três conjuntos em que cada um deles incorpora um modelo com o diâmetro das pedras inferior e igual ao do provete. Estes três conjuntos apresentam as mesmas características, no entanto, o rácio utilizado é diferente para todos eles pois, k_h manteve-se constante e k_v foi alterado. Um dos modelos é isotrópico pois apresenta $r_K=1$, os restantes são anisotrópicos pois o rácio considerado foi de 2 e 4. Como demonstrado no Quadro 5-3, para uma anisotropia de 2 foi utilizado um $k_v=0,5E^{-7}$ m/s e $k_h=1,0 E^{-7}$ m/s e para 4 foi utilizado um $k_v=0,25E^{-7}$ m/s e $k_h=1,0E^{-7}$ m/s. Para além disso, no Quadro 5-3, para os diversos modelos, está representada uma relação entre o diâmetro das pedras porosas em que, quando esta relação é 1 significa que o diâmetro das pedras porosas é igual ao diâmetro do provete enquanto que, quando a relação é 0,47 o diâmetro das pedras é inferior ao do provete.

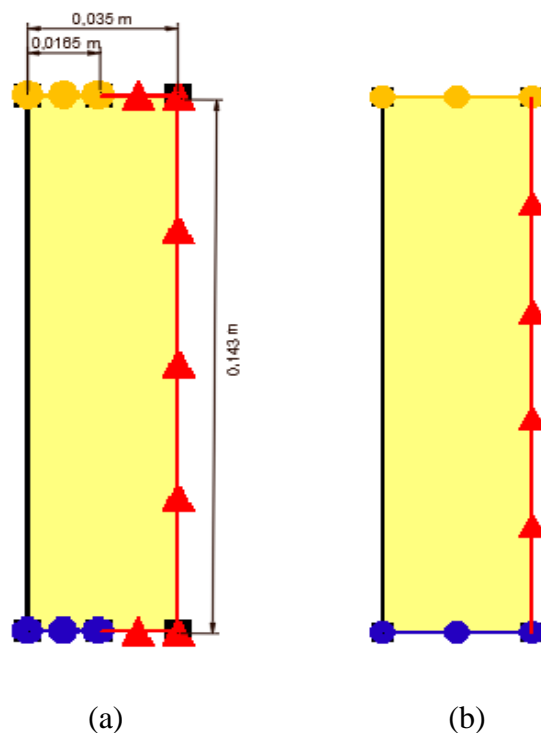


Figura 5-12: Geometria do modelo incluindo a atribuição das respetivas condições de fronteira: a) modelo com o diâmetro das pedras porosas inferior ao provete; b) modelo com o diâmetro das pedras porosas igual ao do provete

Quadro 5-3: Representação das características atribuídas a cada um dos modelos

Modelo	D_p/D_a	k_h (m/s)	k_v (m/s)	r_K
A1	1	$1,0E^{-7}$	$1,0E^{-7}$	1
A2	0,47	$1,0E^{-7}$	$1,0E^{-7}$	1
B1	1	$1,0E^{-7}$	$0,50E^{-7}$	2
B2	0,47	$1,0E^{-7}$	$0,50E^{-7}$	2
C1	1	$1,0E^{-7}$	$0,25E^{-7}$	4
C2	0,47	$1,0E^{-7}$	$0,25E^{-7}$	4

* D_p = diâmetro da pedra porosa; D_a = diâmetro da amostra

5.4.4. Resultados obtidos

Com o objetivo de determinar o caudal percolado de um provete recorrendo à lei de Darcy para, posteriormente, compará-lo com o modelo desenvolvido no software Geostudio 2012, foi atribuída uma permeabilidade de $1,0E^{-7}$ m/s. Denota-se relevante mencionar que a carga hidráulica é de 1 m e o comprimento do caminho de percolação é de 0,143 m e, deste modo, obteve-se um gradiente hidráulico de 6,99. De forma a determinar a área da secção transversal do provete, sabendo que a sua geometria era um

círculo com raio de 0,035 m, a área obtida foi de 0,003848 m². Após obter o valor da permeabilidade, do gradiente hidráulico e da área da secção transversal, substituiu-se na equação (5-11) e o caudal obtido foi de 2,69x10⁻⁹ m³/s.

De acordo com o software e como demonstra a Figura 5-13, que corresponde ao modelo isotrópico, o caudal percolado é de 2,69x10⁻⁹ m³/s. O caudal obtido no software é igual ao caudal determinado através da lei de Darcy. Por outro lado, o caudal obtido no modelo com pedras porosas com diâmetro inferior ao provete representado na Figura 5-14, apresenta um caudal de 2,14x10⁻⁹ m³/s. Com isto, pode-se verificar que a diminuição do diâmetro das pedras porosas diminui o caudal percolado e altera a rede de percolação pois como se verifica na Figura 5-13 a direção do fluxo é apenas vertical e na Figura 5-14 o fluido é percolado nas duas direções.

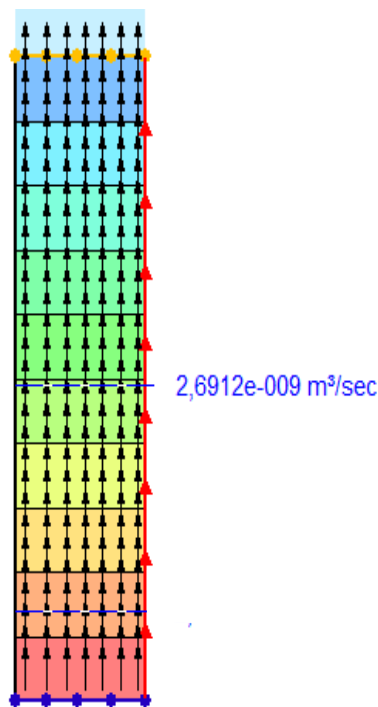


Figura 5-13: Caudal e vetores de fluxo obtidos através do SEEP/W com o diâmetro das pedras porosas igual ao do provete

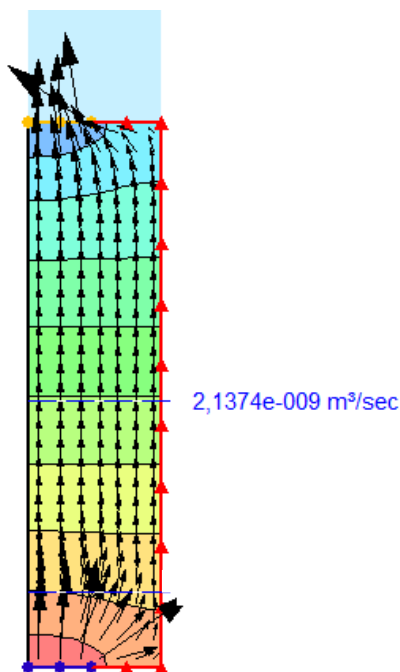


Figura 5-14: Caudal e vetores de fluxo obtidos através do SEEP/W com o diâmetro das pedras porosas inferior ao de um provete

De forma a determinar o efeito do estrangulamento causado pela redução do diâmetro das pedras porosas durante a execução de ensaios triaxiais, foi calculado um fator que relaciona as diferenças de caudal entre o modelo com pedras porosas de diâmetro igual à amostra e o modelo com as pedras com diâmetro inferior. Este fator permitiu criar uma fórmula para determinar o coeficiente de permeabilidade, incluindo um fator de correção como demonstra a equação (5-15):

$$k = \frac{Q}{I.S} \alpha \quad (5-15)$$

em que:

k - coeficiente de permeabilidade;

i - gradiente hidráulico;

S - área da secção transversal do solo;

Q - caudal percolado.

5 – Determinação da permeabilidade no ensaio triaxial

Como referido anteriormente, o fator de correção foi determinado através de uma relação entre o modelo com diâmetro das pedras porosas e dos provetes iguais com, os modelos de diâmetro das pedras porosas inferiores ao provete. Isto é, o fator corretivo representado por α , corresponde à relação dos caudais sem e com estrangulamento. Para os diferentes rácios, foram determinados os diferentes caudais para os três conjuntos representados no Quadro 5-4. Para além disso, neste quadro, estão representados para cada um dos conjuntos os diferentes valores de k_h e k_v .

Quadro 5-4: Quadro com os fatores corretivos de acordo com a anisotropia

Valores de r_K	k_h (m/s)	k_v (m/s)	Caudal obtido com diâmetro da pedra porosa e provete igual (m^3/s)	Caudal obtido com o diâmetro da pedra porosa inferior ao provete (m^3/s)	α
1	$1,0E^{-7}$	$1,0E^{-7}$	$2,69 \times 10^{-9}$	$2,14 \times 10^{-9}$	1,26
2	$1,0E^{-7}$	$0,50E^{-7}$	$1,35 \times 10^{-9}$	$1,14 \times 10^{-9}$	1,18
4	$1,0E^{-7}$	$0,25E^{-7}$	$6,73 \times 10^{-10}$	$6,02 \times 10^{-10}$	1,12

Todos os caudais representados no Quadro 5-4 oriundos do software, estão representados na Figura 5-13, Figura 5-14, Figura 5-15 e Figura 5-16 com os respetivos valores de r_K .

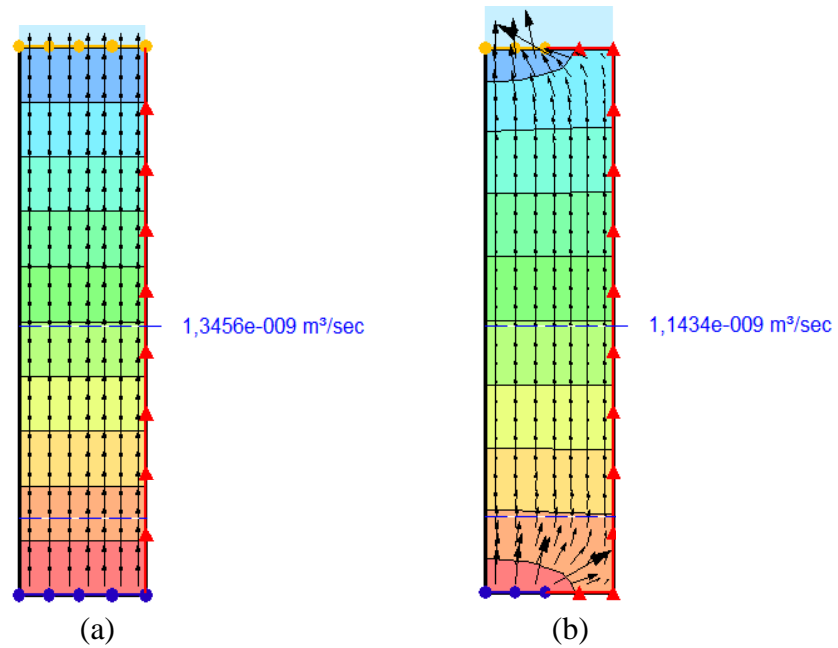


Figura 5-15: Caudal percolado com uma anisotropia de 2: a) no modelo com o diâmetro das pedras porosas e do provete iguais; b) no modelo com o diâmetro das pedras porosas inferior ao do provete

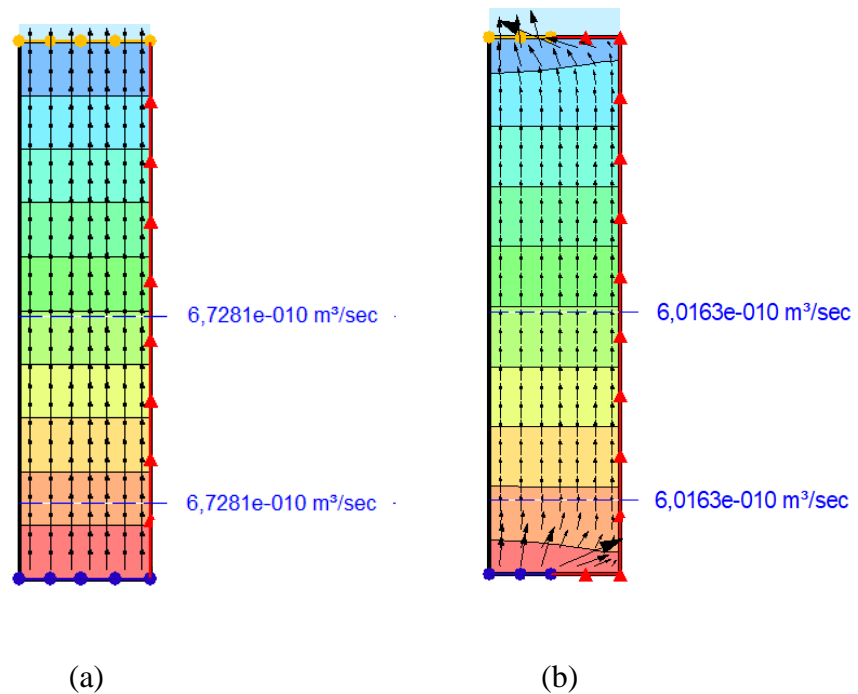


Figura 5-16: Caudal percolado com uma anisotropia de 4: a) no modelo com o diâmetro das pedras porosas e do provete iguais ; b) no modelo com o diâmetro das pedras porosas inferior ao do provete

Após obter os resultados através do software utilizado, verificou-se que, mantendo constante a permeabilidade horizontal e diminuindo a permeabilidade vertical, foram obtidos diferentes caudais. Sendo que, com a diminuição da permeabilidade vertical houve uma diminuição do caudal percolado. Para ter em conta o rácio, foram determinados fatores corretivos em função da anisotropia de permeabilidade. Como já referido anteriormente, o fator corretivo foi determinado através da relação dos caudais sem e com estrangulamento. No caso do modelo isotrópico ($r_K=1$), obteve-se um fator corretivo de 1,26 para um $r_K=2$, o fator é de 1,18 e para um $r_K=4$ o fator corretivo é de 1,12.

6. Conclusões e desenvolvimentos futuros

6.1. Considerações finais

Na presente dissertação, um dos principais objetivos foi comparar dois métodos para determinar a densidade das partículas sólidas. Para esta comparação, foram utilizadas as normas NP-83: 1965 e ASTM D5550-06 (ASTM, 2006), sendo que, a primeira norma é correspondente ao picnómetro com água destilada e a segunda é relativa ao picnómetro com hélio. A comparação teve como principal objetivo, analisar as densidades obtidas através dos dois picnómetros e as vantagens e desvantagens dos dois procedimentos. Desta forma, verificou-se que os valores das duas técnicas, apresentam uma variação mínima e o picnómetro com hélio apresenta maior número de vantagens. Apesar de ser um aparelho com um custo mais elevado, possibilita determinar a densidade de uma forma mais rápida e em larga escala.

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 amostras 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 o método de reconstituição de Corrêa (2018). O equipamento desenvolvido tem de ser preparado de forma delicada e cuidadosa pois, existem alguns fatores como a existência de saliências no tubo e na base metálica do pedestal que, poderão romper a membrana, não sendo possível realizar um ensaio triaxial sobre o provete. O método de reconstituição através da sedimentação pode não corresponder na sua totalidade à realidade. Por isto, os resultados obtidos através de ensaios triaxiais por alguns autores, poderão induzir em alguns erros e colocar em risco as estruturas de deposição de rejeitados. 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.

Ademais, outro dos objetivos foi determinar o efeito de estrangulamento causado pela redução do diâmetro das pedras porosas, num provete durante a determinação da permeabilidade num ensaio triaxial. Depois de modelar os provetes com os respetivos diâmetros das pedras porosas no *software* Geostudio, verificou-se que, as pedras porosas têm influência sobre o caudal percolado e a rede de fluxo. A diminuição do diâmetro das pedras porosas em relação ao provete, reduzem o caudal percolado e, conseqüentemente interfere na determinação da permeabilidade. Com os diferentes caudais obtidos no Geostudio, determinou-se um fator corretivo através dos diferentes modelos. Para estes modelos, atribuiu-se as mesmas características, no entanto, os rácios foram diferentes para os três conjuntos. Para o modelo isotrópico, obteve-se um fator corretivo de 1,26 para uma anisotropia de 2 o fator corretivo é de 1,18 e por fim, para uma anisotropia de 4 este fator é de 1,12.

6.2. Desenvolvimentos futuros

O estudo realizado nesta dissertação apresentou alguns dos aspetos ligados à reconstituição de amostras em laboratório. A reconstituição teve como objetivo reproduzir provetes através da sedimentação de forma a recriar os fenómenos que

ocorrem nas instalações de deposição de rejeitados. No entanto, através da informação adquirida é possível perspetivar desenvolvimentos futuros pois existem muitas questões que necessitam de estudos mais aprofundados. Desta forma, para pesquisas futuras aconselham-se as seguintes sugestões:

- 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.

Referências

Abreu, I. C., Oliveira, S., Filho, W. L. O., Fourie, A. (2016). *Slurry Deposition Method For Reconstituting Specimens For Triaxial And Consolidation Tests*. COBRAMSEG.

Aldea, C.M., Connolly, K. (2014). *Successful recipes for mine paste backfill*. 17th International Seminar on Paste and Thickened Tailings (Paste 2014) (Fourie, A.B., Jewell, R.J., Wells, P.S., Zyl, D., ed.), 8-12 June 2014, Vancouver, Canada, 341-354, InfoMine.

ASTM (2006). *ASTM D5550-06: Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer*. ASTM International.

Azam, S., Li, Q. (2010). *Tailings dam failures: a review of the last one hundred years*. Geotechnical News – Waste geotechnics, pp. 50-53.

Bedin, J. (2010). *Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração*. Dissertação de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Belem, T., Benzaazoua, M. (2004). *An overview on the use of paste backfill technology as a ground support method in cut-and-fill mines*. 5th International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction (Villaescusa, E., Potvin, Y., ed.), 28-30 September, Perth, Australia, 367-650, Taylor & Francis Group, London.

Blight, G. (2010). *Geotechnical engineering for mine waste storage facilities*. CRC Press.

Boszczowski, R. B. (2001). *Avaliação da tensão lateral de campo de argilas sobreadensadas: ensaios de laboratório com um solo da formação guabirotura*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Caldeira, L., Espósito, T. (2010). *Contribuições para a gestão de segurança de barragens de rejeitados*. 12º Congresso Nacional de Geotecnia.

Carraro, J. A., Prezzi, M. (2007). *A New Slurry-Based Method of Preparation of Specimens of Sand Containing Fines*. ASTM. Geotechnical Testing Journal, Vol. 31, No. 1.

Castro, G. (1969), *Liquefaction of Sands*, Ph.D. Thesis, Harvard University, Cambridge, MA.

Castro, J. F. A. (2015). *Melhoramento de um solo arenoso por aticação alcalina*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto.

Carvalho, G. B. (2018). *Incidências de impactos decorrentes de acidentes com barragens de rejeito*. Dissertação de Mestrado, Ouro Preto.

CEN ISSO/TS 17892-4:2004. Geotechnical investigation and testing-Laboratory testing of soil. Part 4: *Determination of particle size distribution*.

Cerqueira, A. M. S. (2016). *Consolidação de solos através de estacas de brita. O caso de estudo de Kyebando no Kampala Northern Bypass (Uganda)*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro.

Coqueira, S. (2014). *Metodologia para o controlo geoambiental da bacia de contenção de rejeitados da Sociedade Mineira de Catoca em Angola*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto.

Costa, L. S. P. (2014). *Estudo da consolidação de solos siltosos jovens*. Dissertação de Mestrado, ESTGV, Viseu.

Corrêa, M. M. (2018). *Impacto da reconstituição de amostras de laboratório na avaliação do potencial de liquefação em depósitos de rejeito*. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Costa, C. F. G. (2008). *Desenvolvimento de um sistema de monitorização e controlo para ensaios triaxiais de solos*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto.

Daliri, F. (2013). *The influence of desiccation and stress history on monotonic and cyclic shear response of thickened gold tailings* (Doctoral dissertation). Carleton University, Ottawa.

Davies, M. P., McRoberts, E., Martin, T. (2002). *Static Liquefaction of Tailings – Fundamentals and Case Histories*. Tailings Dams 2002, ASDSO Conference., Las Vegas, Nevada.

DNPM (2002). *Normas Reguladoras de Mineração – NRM*. Portaria Nº 12 , de 22 de janeiro de 2002 publicada no DOU de 29 de janeiro de 2002, Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, Ministério de Minas e Energia, Brasil.

Dromer, J. B., Aubertin, M., Kennedy, G., Pedroni, L., Bussièrre, B. (2004). *A new testing system to investigate the sedimentation and consolidation of sludge and slurry*. In Proceedings of the 57th Canadian Geotechnical Conference. Quebec, Canada, pp. 16-23.

Engels, J. (2006). *An expert management system for surface tailings storage* (Doctoral dissertation). University of Leeds.

EPA. (1994). Technical report: *Design and evaluation of tailings dams*. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC.

Espósito, T. J. (2000). *Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico*. Dissertação de doutoramento, Universidade Federal de Brasília, Brasília.

Fredlund, D. G., Stone, J., Stianson, J. (2011). *Obtaining unsaturated soil properties for high volume change oil sands materials*. Unsaturated Soils: Theory and Practice, pp. 415-420.

Fredlund, M. D. (1999). *The Role of Unsaturated Soil Properties Functions in the Practice of Unsaturated Soil Mechanics*. Doctoral dissertation, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.

Gibson, R. E., England, G. L., Hussey, M. J. L. (1967). *The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays*. Geotechnique, 17(3), pp. 261-273.

Gibson, R. E., Schiffman, R. L., Cargill, K. W. (1981). *The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays*. II. Finite nonlinear consolidation of thick homogeneous layers. Canadian geotechnical journal, 18(2), pp. 280-293.

Hooper, D., Francis. F., Alves. L., Lemos, T. Recuperado em 27 Novembro, 2019, de <https://pt.slideshare.net/ezequielborges7/compresso-triaxial-revisado>.

Imai, G. (1981). *Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay materials*. Soils and Foundations, 21(1), pp. 7-20.

Jewell, R.J., Fourie, A.B. (2006). *Paste and Thickened Tailings – A Guide*. Second Edition, Australian Centre for Geomechanics, Editors: R. J. Jewell and A. B. Fourie.

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.

Klohn, E. J. (1982). *Tailings dam design*. Seminar on Geotechnical Aspects of Mine Design and Tailings Containment, Edmonton, Canada.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River.

Krizek, R. J., Pepper, S. F. (2004). *Slurries in geotechnical engineering*. The Twelfth Spencer J. Buchanan Lecture.

Kynch, G.J. (1952). *A theory of sedimentation*. Trans., Faraday Soc., 48, pp. 166-176.

Landriault, D. (1995). *Paste backfill mix design for Canadian underground hard rock mining*. In 97th Annual General Meeting of CIM. Rock Mechanics and Strata Control Session. Halifax, Nova Scotia.

Lopes, S. V. (2016). *Estudo do comportamento e modelação de argilas da encosta de Monte Gordo, Vila Franca de Xira*. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa.

Marques, F. P. V. S. (2011). *Influência de finos não plásticos na resistência à liquefação da Areia de Coimbra: Ensaio laboratorial e modelação numérica*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto.

Matos Fernandes, M. (2006). *Mecânica dos solos: conceitos e princípios fundamentais*. FEUP edições.

McLeod, H. & Murray, L. (2003). *Tailings dam versus a water dam, what is the design difference? ICOLD Symposium on Major Challenges in Tailings Dams*. Klohn Crippen Berger Ltd, Canada.

Melo, T. B. (2015). *Estudo da Influência de Parâmetros de Floculação no Espessamento dos Rejeitados das Lavarias da Mina de Neves-Corvo*. Dissertação de Mestrado, Técnico Lisboa.

Neto, J. P. F. (2009). *Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade*. Dissertação de Mestrado, Ouro Preto.

NP 83 (1965). *Solos – Determinação da densidade das partículas*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.

NP 143 (1969). *Solos – Determinação dos limites de consistência*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.

Oliveira, M. (2011). *Desenvolvimento do Projeto de Deposição de Rejeitados Espessados / Pasta de Rejeitados*. Boletim de Minas, 46 (2), pp. 137-141.

Oliveira, M. (2012). SOMINCOR - Mina de Neves Corvo: *A problemática da Gestão dos Resíduos Mineiros*. Jornadas de Investigação e Inovação do LNEC, Lisboa.

Pane, V., Schiffman, R.L. (1985). *A note on sedimentation and consolidation*. University of Colorado, USA.

Pinto, C. S. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas/3ª Edição*, Oficina de Textos, São Paulo-SP.

Raposo, N. (2016). *Deposição de rejeitados espessados. Caracterização experimental e modelação numérica*. Dissertação de Doutoramento, FCUP, Porto.

Raposo, N., Gomes, A. T. (2017). *Caracterização experimental de rejeitados mineiros espessados*. 8º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia / V Congresso de Engenharia de Moçambique.

Reis, J. C. C. L. C. (2017). *Estudo comparativo da aplicação de programas comerciais na modelação de barragens de aterro*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto.

Robinsky, E. (2000). *Sustainable development in disposal of tailings*. Tailings and Mine Waste '00, 23-26 January, Fort Collins, Colorado, 39-48, A. A. Balkema, Rotterdam.

Robinsky, E. I. (2002). *Site planning for thickened tailing disposal*. In Paste and Thickened Tailings International Seminar, Santiago, Chile, April, pp. 9-11.

Rodrigues, H. E. R. (2016). *Mina de Neves-Corvo: Deposição de rejeitado espessado Acompanhamento geotécnico e geoquímico*. Dissertação de Mestrado, FCUP, Porto.

Roque, M. C. R. (2009). *Estudos de caracterização de áreas mineiras degradadas. Proposta de metodologia com aplicação à área mineira de santo antónio, Penedono*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Lisboa.

Russo, F.d.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*. MSc Thesis, University of British Columbia.

Santos, J. A. N. (2012). *Uso de métodos eléctricos para aceleração da consolidação em solos finos argilosos*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico de Lisboa.

Santos, J. R. R. M. S. (2011). *Comportamento geotécnico de solos argilosos do vale diapírico de Sesimbra*. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa.

Silva, J. M. S. d. A. (2010). *Estudo de Liquefação Estática e Cíclica de um Silte com Recurso a Ensaios Triaxiais com Bender Elements*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto.

Silva, M. A. M. (2015). *Estudo da permeabilidade em misturas solo-ligante*. Dissertação de Mestrado, FCTUC, Coimbra.

Silva, W. P. (2010). *Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de olson (2001)*. Dissertação de Mestrado, Ouro Preto.

Somogyi, F. (1979). *Analysis and prediction of phosphatic clay consolidation: implementation package*. Technical Report, Florida Phosphatic Clay Research Project, Lakeland, Fla.

Souza, T. C. (2018). *Metodologia de avaliação de liquefação em barragens de rejeito: Uma abordagem probabilística*. Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte.

Souza, V. M. O. (2016). *Aspectos fundamentais para a análise de estabilidade de taludes de barragens durante rebaixamento rápido*. Dissertação do grau de Bacharel, Brasília.

State of Victoria. (2006). *Management of Tailings Storage Facilities*. Minerals & Petroleum Division, Victoria, Australia.

Sveinson, S. (1999). *Characterisation of Tailings for Paste Backfill System Design* (Doctoral dissertation). The University of British Columbia.

Terzaghi, K., Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice. 2nd Edition*, Jonh Wiley & Sons, New York.

Tremblay, G. (1998). *Subaqueous Tailings Disposal: Results of the MEND program – Case studies on tailings management*. International Council on Metals and the Environment (ICME), United Nations Environment Programme (UNEP).

Tsuchida, H. (1970). *Prediction and countermeasure against the liquefaction in sand deposits*. Seminar in the Port and Harbor Research Institute, Japan.

Vaid, Y. P., Sivathayalan, S., Stedman, D., 1999. *Influence of Specimen-Reconstituting Method on the Undrained Response of Sand*. Geotech.Test. J., Vol. 22, No. 3, pp. 187–196.

Vaid, Y. P., Sivathayalan, S., 2000. *Fundamental Factors Affecting Liquefaction Susceptibility of Sands*. Can.Geotech. J., Vol. 37, pp. 592–606.

Verburg, R., Newman, P., Fordham, M. (2006). *Surface paste disposal of high-sulfide tailings–field cell monitoring and pilot plant testing*, presented at the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD).

Vick, S.G. (1990). *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*. BiTech, Vancouver.

Vieira, S. C. M. V. (2014). *Risco associado a teores elevados de metais na área mineira da Borralha*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro.

Wilson, G. W., Fredlund, D. G., Barbour, S.L. (1994). *Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation*. Canadian Geotechnical Journal 31(2), pp. 151-161.

Winkler, M. K. H. (2012). *Temperature and salt effects on settling velocity in granular sludge technology*. Water Research 46 5445-5451.

Zaidi, A. A. (2015). *Hindered Settling Velocity & Structure formation during particle settling by Direct Numerical Simulation*. Procedia Engineering 102, 1656 – 1666.