



ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA E GESTÃO
INSTITUTO POLITÉCNICO DA GUARDA

CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO
QUÍMICO - GEOTÉCNICO DOS SOLOS
EXISTENTES NO BARREIRO
DENOMINADO POR “BARROQUINHA”

| | | | |
|----------|--|------|------------------------|
| Discente | Patrícia Isabel da Fonseca Dias | Data | Outubro de 2011 |
| | Nº1008892 | | |



ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA E GESTÃO
INSTITUTO POLITÉCNICO DA GUARDA

CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO
QUÍMICO - GEOTÉCNICO DOS SOLOS
EXISTENTES NO BARREIRO
DENOMINADO POR “BARROQUINHA”

| | | | |
|--------------------|--|------|------------------------|
| Orientadora | Professora Dra. Ana Maria Morais Caldas Antão | | |
| Unidade Curricular | Projecto Ambiental | Data | Outubro de 2011 |

DIRC.009.02

Agradecimentos

À Professora Doutora Ana Antão, que com os seus ensinamentos, incentivos, enorme paciência e disponibilidade me orientou, contribuindo de modo decisivo para a realização deste trabalho.

À empresa ARGEX- Argila Expandida, particularmente ao Engenheiro Nelson Costa, pela disponibilidade, meios disponibilizados e cooperação na realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Rui Pitarma pelos conselhos dados.

Ao Professor Doutor Carlos Rodrigues, agradeço a simpatia e interesse com que acompanhou o trabalho.

Ao Daniel pela paciência, apoio e incentivo.

À minha família por sempre me terem ajudado, sem eles certamente não teria chegado aqui.

A todos aqueles que, de alguma forma, colaboraram na realização deste trabalho

Resumo

A necessidade de existirem barreiras naturais ou artificiais à contaminação de solos e aquíferos, derivada da percolação de lixiviados através de aterros sanitários exige, no caso de barreiras naturais, o uso e estudo de materiais adequados.

O presente trabalho visa contribuir para o conhecimento das características dos solos existentes no barreiro denominado “Barroquinha”, localizado na freguesia de Palhaça, Oliveira do Bairro, Aveiro. Este estudo teve como objectivo avaliar as propriedades mais adequadas para a sua caracterização geotécnica.

Com esse fim, foi feita uma caracterização das principais propriedades geotécnicas das amostras recolhidas no barreiro em estudo.

O estudo experimental realizado no âmbito do trabalho, deu ênfase aos aspectos relacionados com propriedades geomecânicas destes materiais argilosos

Finalmente, verificou-se a aplicabilidade dos materiais nos sistemas de impermeabilização de aterros sanitários.

Abstract

The need for artificial or natural barriers in order to avoid soil and underground water contamination due to seepage of and leaching through landfills, demands, in the case of the latter, the use of appropriate materials. This study is focused on the aspects related to consistency limits, particle size and permeability.

This work aims to contribute to the knowledge of the chemical –geotechnical characteristics of existing material on a clay exploration called “Barroquinha”, located in Palhaça, Oliveira do Bairro, Aveiro.

To this end, there was a characterization of the main geotechnical properties of the samples collected. The experimental study in the work focused on aspects related to the geo-mechanical properties of clay materials.

Finally, the applicability of the materials in sealing systems for landfills was also tested.

Índice Geral

| | |
|---|----|
| Introdução | 1 |
| 1 Considerações Geológicas | 3 |
| 1.1 Localização Geográfica..... | 3 |
| 1.2 Enquadramento Geológico | 3 |
| 1.3 A formação Argilas de Aveiro – Ílhavo - Vagos (AAIV)..... | 3 |
| 2 Revisão Bibliográfica. | 7 |
| 2.1 Fundamentos Mineralógicos do Comportamento Mecânico das Argilas..... | 7 |
| 2.1.1 Mineralogia das Argilas..... | 7 |
| 2.1.2 Propriedades das Argilas..... | 16 |
| 2.2 Aterros sanitários | 20 |
| 2.2.1 Impermeabilização de aterros sanitários | 20 |
| 2.2.2 Impermeabilização dos taludes e fundo | 22 |
| 2.2.3 Caracterização dos materiais naturais | 23 |
| 3 Ensaio e metodologias | 25 |
| 3.1 Prospecção e Amostragem | 25 |
| 3.2 Preparação por via seca das amostras..... | 29 |
| 3.3 Determinação do teor em água | 30 |
| 3.4 Determinação dos limites de consistência..... | 31 |
| 3.4.1 Limite de liquidez..... | 31 |
| 3.4.2 Limite de Plasticidade | 34 |
| 3.5 Determinação da densidade das partículas | 35 |
| 3.6 Análise Granulométrica | 36 |
| 3.6.1 Peneiração..... | 36 |
| 3.6.2 Sedimentação..... | 38 |
| 3.7 Determinação da quantidade de azul de metileno e da actividade dos solos..... | 41 |
| 3.8 Determinação da Permeabilidade..... | 42 |
| 4 Resultados e Discussão..... | 45 |
| 4.1 Características “ <i>in situ</i> ” | 45 |
| 4.2 Determinação dos limites de consistência..... | 46 |
| 4.2.1 NP-143..... | 46 |
| 4.2.2 BS 1377..... | 47 |
| 4.2.3 Comparação entre a Norma Portuguesa e a Norma Inglesa..... | 48 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.3 | Determinação da densidade das partículas | 48 |
| 4.4 | Análise Granulométrica | 49 |
| 4.4.1 | Classificação das amostras | 53 |
| 4.5 | Determinação da quantidade de azul de metileno e da actividade dos solos..... | 56 |
| 4.6 | Determinação da Permeabilidade..... | 58 |
| | Conclusão | 62 |
| | Bibliografia | 63 |
| | ANEXOS..... | 65 |

Índice de gráficos

| | |
|---|----|
| Gráfico 1- Relação entre o número de golpes e o teor de água das amostras | 46 |
| Gráfico 2 - Relação entre a penetração e o teor em água das amostras | 47 |
| Gráfico 3- Curvas granulométricas das amostras | 50 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Localização da área e estudo da respectiva carta geológica adaptado de (Barbosa, 1981) | 4 |
| Figura 2 – Afloramentos das “Argilas de Vagos” na zona de Vagos e parte sul (Adaptado de: (Rodrigues, Aguilar, & Mortágua)..... | 5 |
| Figura 3- Representação esquemática duma folha tetraédrica: a) tetraedro de sílica; b) folha tetraédrica de sílica em arranjo hexagonal. Adaptado de (Benta, 2007) | 8 |
| Figura 4- Representação esquemática duma folha octaédrica: a) unidade octaédrica; b) folha octaédrica. Adaptado de (Benta, 2007) | 8 |
| Figura 5 – Folha tetraédrica de sílica vista em planta. Adaptado de (Benta, 2007) | 9 |
| Figura 6- Representação esquemática dos grupos de minerais argilosos com base na estrutura cristalina (Benta, 2007) | 9 |
| Figura 7 – Representação esquemática da estrutura da clorite (Benta, 2007) | 11 |
| Figura 8 – Representação esquemática da estrutura da vermiculite (Benta, 2007) | 12 |
| Figura 9 – Classificação dimensional das partículas existentes num solo (Benta, 2007) | 13 |
| Figura 10 – Distribuição dos iões adjacentes à superfície de mineral argiloso, de acordo com o conceito da dupla camada (Benta, 2007)..... | 14 |
| Figura 11 - Esquema simplificado de confinamento ou isolamento de aterro sanitário. Fonte: (Santos, 1998)..... | 22 |
| Figura 12- Exemplo de um sistema de impermeabilização de fundo e taludes. Adaptado de: (Lopes, 1997) | 23 |
| Figura 13 – Exemplo de sistema de impermeabilização de cobertura. Adaptado de (Lopes, 1997) | 23 |
| Figura 14 – Programa de ensaios..... | 25 |
| Figura 15 – Localização no barreiro da zona de recolha das amostras P_0 e P_1 | 26 |
| Figura 16 – Localização no barreiro da zona de recolha das amostras P_2 e P_3 | 26 |
| Figura 17 – Recolha com amostrador | 27 |
| Figura 18- Acondicionamento das amostras simples e das amostras recolhidas com o amostrador..... | 27 |
| Figura 20 – Processo de desagregação dos torrões e peneiração..... | 29 |
| Figura 19 - Aspecto das amostras durante a secagem..... | 29 |
| Figura 21- Equipamento utilizado no Desgaste de Los Angeles | 30 |
| Figura 22 – Pasta homogénea amostra P_1 | 31 |
| Figura 23 - Ensaio terminado com sulco fechado | 32 |
| Figura 24 - Ensaio do cone penetrométrico | 33 |
| Figura 25- Determinação do limite de liquidez através do cone amostra P_1 | 33 |
| Figura 26 – Comparação do filamento com uma carga de esferográfica de 3mm de diâmetro.34 | |
| Figura 27 – Amostras nos picnómetros..... | 36 |
| Figura 28 - Colocação do densímetro na proveta..... | 39 |
| Figura 29 - Leitura com o densímetro..... | 39 |
| Figura 30 - Equipamento utilizado para determinação do coeficiente de permeabilidade de carga variável..... | 43 |
| Figura 31- Localização das amostras na Carta de Plasticidade de Casagrande..... | 54 |
| Figura 32 - Localização das amostras no diagrama triangular..... | 55 |

| | |
|---|----|
| Figura 33 - Papel de filtro utilizado no ensaio do azul de metileno pelo método da mancha | 56 |
| Figura 34 – Permeabilidade, características de drenagem dos solos e métodos para a sua determinação. Fonte: (Al-Khafaji & Andersland, 1992) | 61 |

Índice de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – CTC e CTA de alguns grupos de minerais de argila. (Antão, 2007) | 16 |
| Tabela 2- Valores da superfície específica para alguns grupos de minerais argilosos (Benta, 2007) | 17 |
| Tabela 3- Classificação das argilas em função do limite de liquidez..... | 18 |
| Tabela 4 – Classificação dos solos quanto à plasticidade | 19 |
| Tabela 5 - Classificação das Argilas quanto à <i>actividade</i> | 19 |
| Tabela 6 – Características dos locais mais indicados à construção de aterro sanitário..... | 21 |
| Tabela 7 – Principais ensaios a realizar para a caracterização de materiais naturais de impermeabilização..... | 24 |
| Tabela 8- Características das amostras “ <i>in situ</i> ” | 46 |
| Tabela 9 – Valores obtidos pelos dois métodos | 47 |
| Tabela 10- Densidade média das partículas..... | 48 |
| Tabela 11 – Classes granulométricas | 49 |
| Tabela 12 – Classificação geotécnica | 49 |
| Tabela 13 - Composição Granulométrica das amostras..... | 51 |
| Tabela 14 - Coeficiente de uniformidade e coeficiente de curvatura das amostras | 52 |
| Tabela 15 – Volume de azul de metileno | 57 |
| Tabela 16 – Fracção argilosa e actividade dos solos..... | 57 |
| Tabela 17 – Estado do solo, Compactação e Saturação das amostras | 58 |
| Tabela 18 – Características iniciais e finais das amostras sujeitas ao ensaio de permeabilidade | 60 |
| Tabela 19 – Coeficientes de permeabilidade | 60 |

Simbologia

AAIV- Argilas de Aveiro – Ílhavo - Vagos

ASTM – American Society for Testing and Materials

BS- British Standard

CTA- Capacidade de troca aniónica

CTC – Capacidade de troca catiónica

E – Especificação do LNEC

EN – Estrada Nacional

Gs- Densidade das partículas

IP- Índice de plasticidade

k – Coeficiente de permeabilidade

LL – Limite de liquidez

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LP- Limite de plasticidade

MA – Milhões de Anos

NF - Norma Francesa

NP- Norma Portuguesa

USC - Classificação Unificada de Solos

VBS- Valor de azul de metileno de um solo

W – Teor em água

Introdução

O presente trabalho tem como objectivo contribuir para o estudo químico geotécnico dos solos existentes no barreiro denominado por “Barroquinha”, localizado na formação geológica *Argilas de Aveiro – Ílhavo - Vagos*.

A exploração deste barreiro, cabe à empresa Argex – Argila Expandida, sediada na zona industrial de Bustos, Oliveira do Bairro, sendo o material utilizado essencialmente para a produção de argila expandida.

A argila expandida é um agregado leve de formato esférico, disponível em vários diâmetros.

Dada a importância geotécnica dos solos desta zona, estão disponíveis diversos estudos da área em questão, alguns dos quais serviram como base ao presente trabalho. Salientam-se: a Carta Geológica de Portugal folha 16 – C e respectiva Notícia Explicativa (Barbosa, 1981), “Cartografia Geotécnica no Planeamento do Concelho de Oliveira do Bairro” (Rodrigues, 1994) e “Aspectos do Comportamento geomecânico da Formação “*Argilas de Aveiro*” ” (Benta, 2007).

O uso de argila para contenção de contaminantes, tem sido uma prática comum nos últimos anos nos países mais desenvolvidos, nomeadamente fazendo a sua aplicação nos sistemas de impermeabilização de aterros sanitários.

Para além destas considerações iniciais, com as quais se procura justificar a importância do tema em estudo, este trabalho está organizado em 4 capítulos.

No capítulo 1 é feito o enquadramento geográfico e geológico do local em estudo, dando ênfase à formação geológica “*Argilas de Aveiro - Ílhavo - Vagos*”.

No capítulo 2, procedeu-se à revisão bibliográfica das principais características e propriedades das argilas, bem como da constituição dos aterros sanitários dando ênfase aos sistemas de impermeabilização.

No capítulo 3, é descrita a metodologia adoptada, iniciando-se com a referência à localização das amostras recolhidas e a preparação das amostras. Em seguida são descritos os estudos laboratoriais realizados, sendo eles: teor em água, limites de consistência

densidade das partículas, granulometria, absorção do azul de metileno pelo método da mancha e permeabilidade.

No capítulo 4, procede-se à análise e interpretação dos resultados obtidos nos estudos laboratoriais realizados. Começa-se por descrever as características “in situ” relativamente ao teor em água, baridade, índice de vazios e grau de saturação.

Finalmente, efectuam-se algumas considerações finais, apresentando as principais conclusões retiradas do trabalho realizado.

1 Considerações Geológicas

1.1 Localização Geográfica

A zona em estudo situa-se no distrito de Aveiro, concelho de Oliveira do Bairro. O barreiro é conhecido por “Barroquinha” está situado no lugar de Albergue, freguesia de Palhaça.

Situa-se a 600m da EN 333, do lado direito para quem circula sentido Bustos -Ouça, estando a 1.2Km de Bustos e a 1.8Km de Ouça.

A área em estudo está incluída na folha 196 da Carta Militar de Portugal à escala 1:25 000. (Ver anexo I).

O Concelho é atravessado pelas Auto - estradas A1 e A17, estando a zona em estudo localizada entre ambas as autoestradas.

1.2 Enquadramento Geológico

A área abrangida pelo concelho de Oliveira do Bairro, situa-se na Orla Meso-Cenozóica sendo constituída por formações sedimentares do Secundário - Terciário. Estas formações sedimentares são constituídas essencialmente por: argilas, areias, cascalheiras, margas, calcários e arenitos.

A região em estudo, está delimitada a sul pelo anticlinal Mogofores – Febres – Tocha, a oeste pelo Oceano Atlântico e a N-NE pela falha Porto - Tomar que separa a orla meso-cenozóica ocidental do maciço Hespérico.

1.3 A formação Argilas de Aveiro - Ílhavo - Vagos (AAIV)

O barreiro faz parte da formação C⁵ das Argilas de Vagos de acordo com a carta geológica de Portugal -1/50 000, folha 16 –C dos Serviços Geológicos de Portugal. (Ver Anexo II)

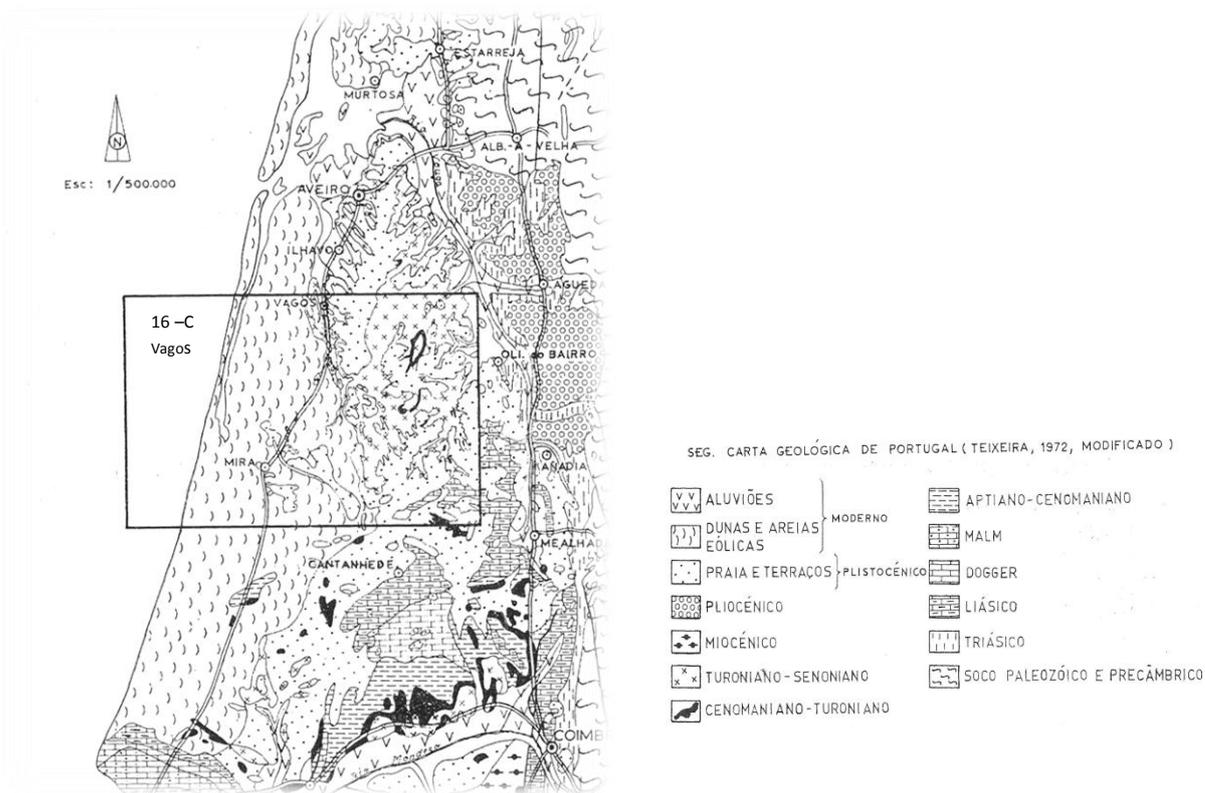


Figura 1 - Localização da área e estudo da respectiva carta geológica adaptado de (Barbosa, 1981)

Segundo a folha 16-C Vagos (Figura 1), são cartografadas na área três unidades: Quaternário, Cretácico e Jurássico Inferior (Liásico), sendo a série sedimentar Cretácica a que apresenta maior desenvolvimento na área mapeada. (Barbosa, 1981)

O Cretácico é a unidade que tem um desenvolvimento mais importante na região de Aveiro.

A unidade *Argilas de Aveiro* é correspondente às *Argilas de Vagos* segundo Barbosa (1981). São os mais recentes sedimentos Cretácicos, pertencendo ao final do período Cretácico mais concretamente ao Cretácico Superior segundo Barbosa (1981) admite para eles idade Santoniana (?) – Maestrichtiana (60±5MA).

As *Argilas de Aveiro* aparecem desde o Rio Vouga, a Norte e a Este, e estendem-se para Sul até Mira. Estão quase sempre cobertos pelos Depósitos Modernos, permitindo que as AAIV aflorem nos contornos das depressões topográficas, concedendo um aspecto dentrítico aos afloramentos (Benta, 2007).

Segundo Benta (2007) a composição litológica da formação *Arenitos e Argilas de Aveiro* compreende:

- i. Argilas maciças de cores esverdeadas, acinzentadas ou avermelhadas;
- ii. Níveis carbonatados de calcários margosos
- iii. Níveis silto-argilosos ou areno- argilosos;
- iv. Margas e Dolomias.

Enquanto a unidade Argilas de Vagos, no geral, é constituída por camadas de argilas muito esverdeadas e avermelhadas, de espessura variando ente 0,3m e 1,5m. Entre as camadas argilosas surgem por vezes, camadas gresosas de cor amareladas ou cinzenta - claro, e/ou camadas de calcários dolomíticos (Barbosa, 1981).

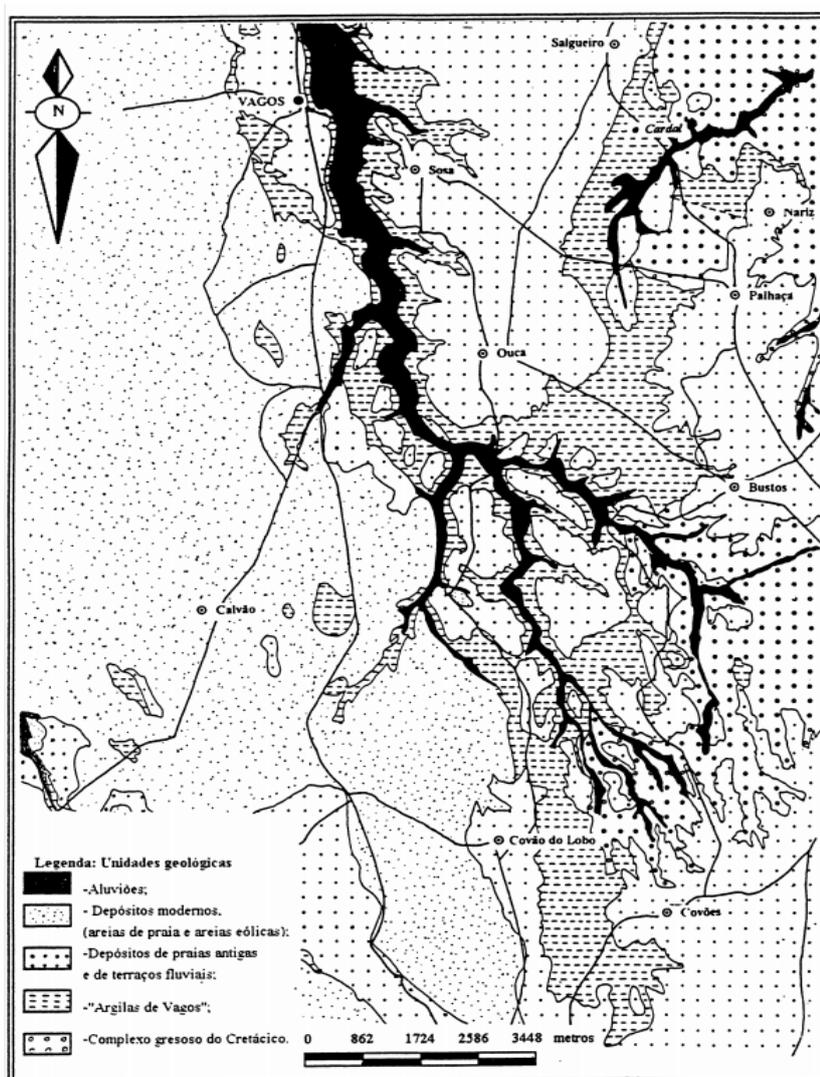


Figura 2 – Afloramentos das “Argilas de Vagos” na zona de Vagos e parte sul (Adaptado de: (Rodrigues, Aguilar, & Mortágua)

Estas unidades litoestratigráficas (Figura 2) desenvolvem-se desde Cacia (Norte de Aveiro) até Mira, passando pelos concelhos de Aveiro, Ílhavo e Vagos, ocupando uma área aproximada de 100Km², com cerca de 5km de largura média e 20km de comprimento médio (Galhano, Gomes, & Rocha).

A espessura desta unidade é bastante variável sendo mínima para Norte, com cerca de 10 metros em Cacia e máxima em Vagos, com cerca de 150 metros (Barbosa, 1981).

2 Revisão Bibliográfica.

2.1 Fundamentos Mineralógicos do Comportamento Mecânico das Argilas

O termo argila permite vários conceitos consoante o domínio em que é usado.

Em Sedimentologia é utilizado para, em termos granulométricos, designar as partículas menores que $2\mu\text{m}$. Em Petrografia designa uma rocha friável constituída por partículas não identificáveis macroscopicamente e que se torna plástica quando misturada com água. Em Mineralogia designa os chamados minerais argilosos filossilicatos (aluminossilicatos hidratados podendo conter iões tais como: Mg, Fe, Ca e K, entre outros) (Jeremias, 1991).

Em geotecnia, argila designa um solo constituído essencialmente por minerais argilosos, podendo conter ainda minerais não argilosos, matéria orgânica e impurezas (E 219, 1968).

Segundo a Classificação Unificada de Solos (USC), uma argila será um material que se enquadra nos grupos CL- (argilas de baixa plasticidade), ou CH- (argilas de alta plasticidade), sendo a plasticidade dos materiais argilosos a propriedade mais correlacionável com o seu comportamento geomecânico (Benta, 2007).

2.1.1 Mineralogia das Argilas

2.1.1.1 Minerais argilosos

Os minerais argilosos são filossilicatos, designados assim por se tratar de compostos baseados em silício, oxigénio e alumínio e possuem modelos estruturais organizados em folhas e camadas. Frequentemente estão aí presentes iões de ferro, de magnésio, de potássio e de sódio.

O isomorfismo atómico é a capacidade de elementos químicos análogos poderem substituir-se na estrutura dum mineral, sendo esta possível se os números de coordenação forem iguais ou se as configurações das ligações atómicas forem idênticas.

O grau de perfeição do isomorfismo atômico é dependente das distâncias interatômicas, dos tipos de ligações químicas e das temperaturas de formação dos minerais.

A estrutura dos filossilicatos é formada com base na combinação de apenas duas unidades estruturais simples: os tetraedros de sílica e os octaedros de alumínio ou magnésio.

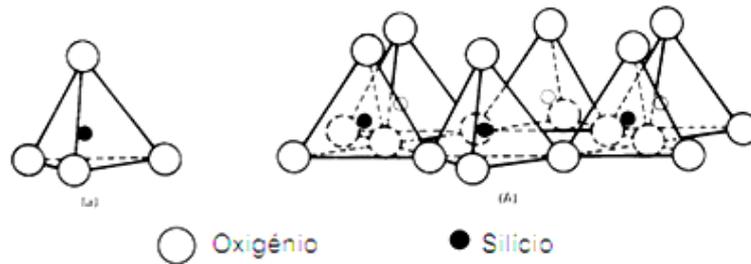


Figura 3- Representação esquemática duma folha tetraédrica: a) tetraedro de sílica; b) folha tetraédrica de sílica em arranjo hexagonal. Adaptado de (Benta, 2007)

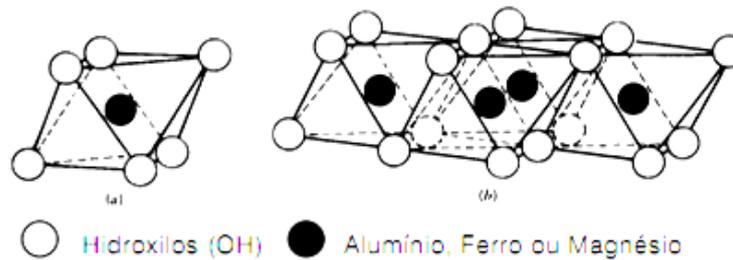


Figura 4- Representação esquemática duma folha octaédrica: a) unidade octaédrica; b) folha octaédrica. Adaptado de (Benta, 2007)

As unidades estruturais ligam-se entre si para formar estruturas em folhas de configuração poliédrica de tetraedros (Figura 3) ou octaedros (Figura 4).

Na folha de sílica, os tetraedros associam-se em arranjos hexagonais, que se podem repetir indefinidamente, com as bases dos tetraedros todas no mesmo plano (Figura 5).

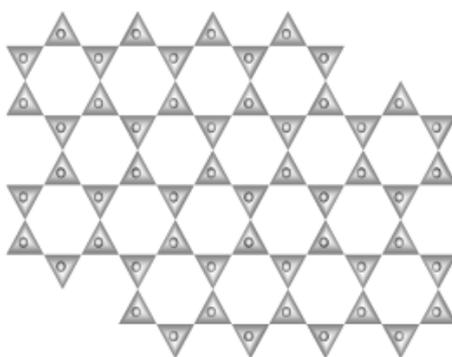


Figura 5 – Folha tetraédrica de sílica vista em planta. Adaptado de (Benta, 2007)

A maneira como os átomos se ligam nas unidades tetraédricas e octaédricas, o arranjo das folhas em camadas e a organização das camadas e dos espaços intercamadas, determinam a existência de diferentes grupos de minerais argilosos.

Os minerais argilosos organizam-se em camadas estruturais do tipo 1:1 (t-o) e em camadas do tipo 2:1 (t-o-t), como se pode constatar na figura 6 (Jeremias, 1991) .

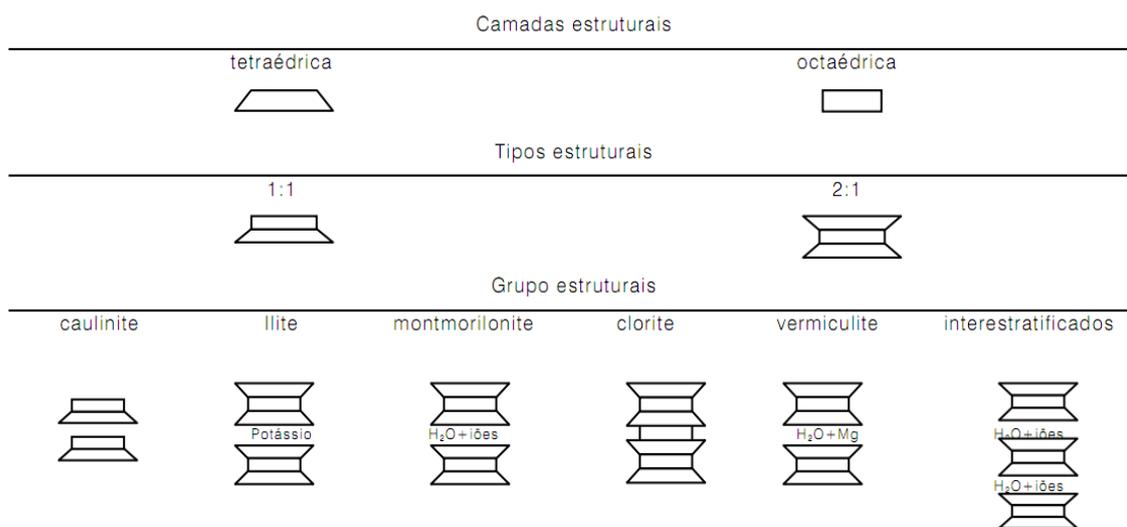


Figura 6- Representação esquemática dos grupos de minerais argilosos com base na estrutura cristalina (Benta, 2007)

Os minerais de argila têm a sua gênese ligada a processos de neoformação, transformação e herança.

Os primeiros são aqueles que não provem da alteração física e/ ou química de outros minerais argilosos pré-existentes, são minerais argilosos que se formam pela primeira vez, como resultado de precipitação química.

Os minerais argilosos transformados resultam de modificações físicas, químicas e mineralógicas em minerais pré-existentes.

Por fim, os minerais argilosos herdados resultam da divisão física de minerais pré-existentes, transportados do lugar inicial de formação para outro local onde foram depositados (Benta, 2007).

2.1.1.2 Principais grupos de minerais argilosos

Grupo da Caulinite

A formula estrutural da caulinite é $(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}$. A caulinite forma-se por alteração química dos feldspatos e das micas existentes em rochas ricas em SiO_2 e Al_2O_3 tais como granitos, pegmatitos ou gnaisses por acção hidrotermal e/ou meteórica (Benta, 2007).

A estrutura das espécies minerais deste grupo consiste numa camada do tipo 1:1 (t-o), formada por uma folha tetraédrica e por uma folha octaédrica. As camadas ligam-se entre si por pontes de hidrogénio entre átomos O^{2-} e por grupos OH^- de planos atómicos justapostos (Jeremias, 1991).

Os minerais deste grupo apresentam baixa capacidade de troca catiónica quando comparada com a de outros minerais argilosos.

Grupo da Illite

A illite pode formar-se por alteração e /ou transformação de outros filossilicatos (micas, clorites ou caulinites) ou de minerais não filossilicatos (feldspatos, piroxenas). A estrutura destes minerais assemelha-se à das micas das quais derivam, por alteração física e química (Benta, 2007).

Estes minerais argilosos têm uma estrutura do tipo 2:1 (t-o-t), são constituídos por uma folha octaédrica intercalada entre duas folhas tetraédricas, sendo as camadas estruturais ligadas por catiões monovalentes, K^+ e/ou Na^+ .

A composição química da unidade estrutural da illite pode ser representada por $\text{K}_x(\text{Al},\text{Mg})_4(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4.n\text{H}_2\text{O}$ com $x < 1$. Não apresentam expansibilidade intracristalina e possuem baixa capacidade de troca catiónica (Jeremias, 1991).

Os cristais dos minerais apresentam morfologia lamelar com diâmetros situados entre 0.1 e 0.2 μ m.

Grupo das Esmectites

A montmorilonite é o mineral mais frequente deste grupo. A neoformação da montmorilonite está associada a ambientes químicos alcalinos, normalmente solos básicos derivados da alteração de rochas vulcânicas extrusivas (cinzas vulcânicas, riolitos) e em ambientes de fraca drenagem que permitem o aumento da alcalinidade e da concentração salina (Benta, 2007).

A estrutura das esmectites é do tipo 2:1 (t-o-t), sendo constituída por duas folhas tetraédricas e uma folha octaédrica. A elevada capacidade de troca catiónica advém do alto grau de substituição isomórfica.

A expansibilidade intracristalina é a principal característica distintiva das esmectites e resulta do facto da água e líquidos orgânicos poderem penetrar entre as camadas.

Os cristais de montmorilonite apresentam contornos irregulares e têm dimensões muito reduzidas da ordem dos 0.15 μ m, sendo a sua espessura muito mais fina do que a dos cristais de caulinite ou da illite (Jeremias, 1991).

Grupo da Clorite

A clorite argilosa resulta da divisão mecânica de clorites pré-existentes em rochas ígneas ou em rochas metamórficas, podem também resultar da transformação diagenética de outros minerais argilosos com estruturas expansivas (montmorilonites e vermiculites).

A estrutura da clorite (Figura 7) consiste em camadas do tipo 2:1 (t-o-t) e caracteriza-se pela existência de uma folha octaédrica entre as camadas estruturais de folhas tetraédrica – octaédrica - tetraédrica (Benta, 2007).

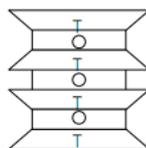


Figura 7 – Representação esquemática da estrutura da clorite (Benta, 2007)

A composição química da clorite pode ter a seguinte expressão: $(\text{Mg,Fe,Al})_{12}(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}$ sendo que os catiões dominantes são o Al^{3+} e Mg^{3+} . As clorites têm uma pequena capacidade troca catiónica (Jeremias, 1991).

Grupo da Vermiculite

As vermiculites formam-se, por transformação, a partir de micas ou de outros minerais argilosos, por exemplo, da montmorilonite. São os minerais argilosos que apresentam maior expansão quando em contacto com a água.

O modelo estrutural (Figura 8) é semelhante ao dos restantes filossilicatos do tipo 2:1 que é equilibrada por catiões, por exemplo Mg^{2+} , intercalados entre duas camadas de moléculas de água (Benta, 2007).

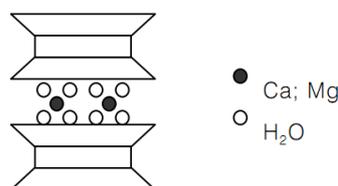


Figura 8 – Representação esquemática da estrutura da vermiculite (Benta, 2007)

A composição química da unidade estrutural da vermiculite pode ser representada por: $\text{E}^+(\text{Mg,Fe}^{2+},\text{Fe}^{3+},\text{Al})_6(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4.n\text{H}_2\text{O}$, em que E^+ representa o catião de troca. A capacidade de troca catiónica é extremamente elevada (Jeremias, 1991).

2.1.1.3 Minerais não argilosos presentes nos solos argilosos

Os minerais não argilosos constituem partículas mais grosseiras que as dos minerais argilosos, normalmente visíveis através da separação granulométrica e com características nitidamente diferentes dos minerais argilosos.

Os solos em geral, são constituídos por partículas de dimensão de argila, siltes, areias e seixos, podendo também conter matéria orgânica, como se pode observar na Figura 9.

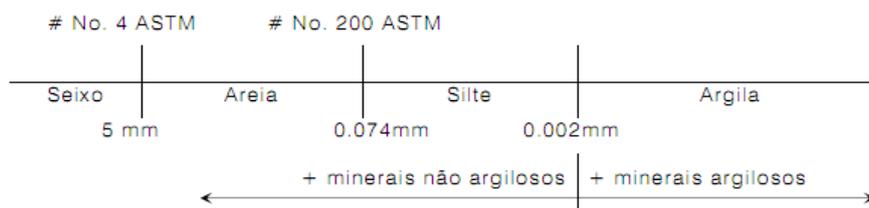


Figura 9 – Classificação dimensional das partículas existentes num solo (Benta, 2007)

A presença de minerais não argilosos nas argilas contribui para a atenuação das propriedades mais características dos minerais argilosos que as compõem, uma vez que os minerais não argilosos constituem-se em partículas granulares (siltes, areias e seixos) cujas propriedades e comportamentos se opõem aos dos minerais argilosos (Benta, 2007).

2.1.1.4 Relação entre fases nas Argilas

Hidratação das argilas

A hidratação das argilas envolve a adsorção de moléculas de água nas superfícies de argila expostas aos diferentes espaços intersticiais. Distinguem-se três modelos de hidratação: hidratação inter-lamelar, hidratação osmótica e condensação capilar de água livre.

Conceito da dupla camada

Nas argilas secas os catiões adsorvidos estão fortemente ligados às partículas de argila consequência da electronegatividade das suas superfícies. Os catiões excedem os necessários para neutralizar a carga eléctrica superficial e os aniões precipitam sobre a forma de sais. Quando a argila entra em contacto com a água estes sais entram em solução.

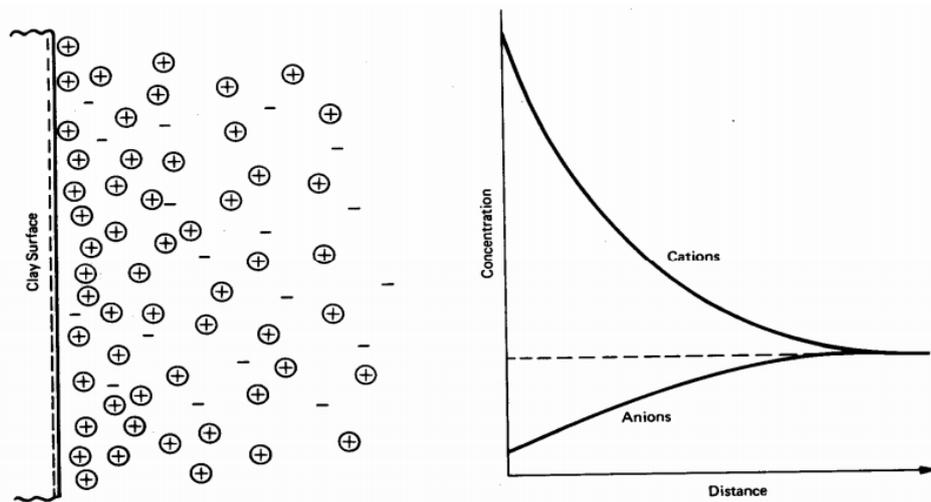


Figura 10 – Distribuição dos íões adjacentes à superfície de mineral argiloso, de acordo com o conceito da dupla camada (Benta, 2007)

Como mostra a figura 10, junto da superfície a concentração de cátions é maior do que na solução envolvente, pelo que haverá tendência para a difusão de cátions no sentido do equilíbrio de concentrações (Benta, 2007).

A carga eléctrica na superfície da partícula, juntamente com a carga eléctrica equilibrante dos íões permutáveis, denomina-se dupla camada eléctrica. A partícula juntamente com a solução micelar denomina-se micela. A solução fora da dupla camada entre as partículas coloidais denomina-se solução intermicelar (Antão, 2007).

A natureza e extensão da dupla camada são afectadas pelos seguintes factores:

- Concentração e composição da solução electrolítica;
- Densidade de carga na superfície da partícula argilosa;
- Temperatura;
- Valência de íões.

Mecanismos de interacção entre partículas de argila e de água

O comportamento das argilas é condicionado pela quantidade de água presente, ou seja pelo seu grau de saturação. As partículas sólidas do solo e a água interagem mutuamente, resultando numa forte atracção e adsorção das moléculas de água pelas superfícies das partículas sólidas. Dada a elevada superfície das argilas, as interacções tomam maior importância (Benta, 2007).

Os mecanismos de interacção argila - água são:

- Ligações de hidrogénio – as cargas negativas dos cristais e as cargas positivas podem atrair água devido a natureza polar desta;
- Hidratação dos catiões de troca – os catiões de troca hidratam envolvendo-se em moléculas de água;
- Atracção por osmose – a distâncias maiores da superfície das partículas de argila a entrada de água tende a diluir a dupla camada e a aproximar a concentração à da solução fora da dupla camada.
- Atracção superfície – dipolo - os dipolos de água tendem a orientar-se com os pólos positivos no sentido da superfície negativa das partículas de argila, podem propagar-se a sucessivas camadas de dipolos.
- Atracção por forças de Van der Waals – as flutuações em fase das nuvens electrónicas dos átomos provocam dipolos temporários que podem exercer atracção sobre dipolos vizinhos (Benta, 2007).

Forças Interpartículas nas argilas

Existe repulsão entre partículas de argila quando as duplas camadas das partículas com a mesma polaridade se interpenetram, devido à interacção de iões permutáveis de igual sinal e de moléculas de água orientadas.

Em soluções mais concentradas, a compressão da dupla camada limita a extensão das forças repulsivas, permitindo que as forças se aproximem e fiquem dentro do raio de acção das forças de atracção formando-se aglomerados de partículas (Jeremias, 1991).

As características do meio influenciam mais as forças repulsivas do que as forças atractivas.

As forças repulsivas (dupla camada) têm um raio de acção maior que as forças atractivas (Van der Waals).

2.1.2 Propriedades das Argilas

2.1.2.1 Coesão

Devido às elevadas forças atractivas inter-partículas resultantes das forças Van der Waals e de forças electrostáticas nas argilas gera-se forte aderência entre partículas adjacentes. Esta tensão atractiva é independente da existência ou não de forças exteriores (Benta, 2007). Isto confere aos minerais argilosos uma coesão muito importante

2.1.2.2 Capacidade de troca iónica, catiónica e aniónica

A capacidade de troca iónica traduz a quantidade de iões que uma argila pode adsorver e trocar. É uma propriedade que resulta do desequilíbrio de cargas eléctricas devidas a substituições atómicas isomórficas (Benta, 2007).

A propensão para trocar catiões e aniões denomina-se respectivamente por capacidade de troca catiónica (CTC) e capacidade de troca aniónica (CTA), e expressa-se em meq/100g (Antão, 2007).

Na tabela 1 mostram-se os valores da capacidade de troca catiónica e aniónica para vários grupos de argila.

Tabela 1 – CTC e CTA de alguns grupos de minerais de argila. (Antão, 2007)

| Grupo | CTC (meq/100g solo) | CTA (meq/100g solo) |
|--------------|----------------------------|----------------------------|
| Caulinites | 5-25 | 5-20 |
| Ilites | 20 -40 | 30-50 |
| Esmectites | 100-120 | 15-40 |
| Vermiculites | 150 -160 | 4 |

A capacidade de troca iónica uma propriedade importante, tendo forte influencia em algumas propriedades físico-químicas das argilas. A extensão das trocas depende da relação do peso sólido para o volume da solução, da concentração electrolítica desta e do seu pH (Antão, 2007).

2.1.2.3 Superfície específica

A superfície específica de uma argila é definida como a área da superfície externa mais a área da superfície interna das partículas constituintes por unidade de massa. A superfície específica de uma dada partícula cresce acentuadamente à medida que diminuem as suas dimensões.

A área da superfície das partículas varia consoante as diferentes formas que estas possam tomar. Podem ter forma esférica, cúbica, planar ou fibrosa.

Na tabela 2 apresentam-se os valores da superfície específica de alguns grupos de minerais argilosos.

Tabela 2- Valores da superfície específica para alguns grupos de minerais argilosos (Benta, 2007)

| Grupo | Superfície específica (m²/g) |
|-----------------|--|
| Caulinites | 5 -40 |
| Ilites | 50 -100 |
| Clorite | 40- 80 |
| Montmorilonites | 150-800 |

O método do azul-de-metileno é um método simples para determinar com suficiente rigor a superfície específica.

2.1.2.4 Expansibilidade

As variações nos teores de água de argila e de solos argilosos são acompanhados por variações volumétricas, quando há entrada de água nos materiais ocorre expansão enquanto a redução do teor de água é acompanhada de retracção. Estas variações estão relacionadas com propriedades como a superfície específica, capacidade de troca catiónica, natureza dos iões de troca e grau de consolidação (Benta, 2007).

As argilas secas têm capacidade para atraírem humidade, do mesmo modo as argilas saturadas podem receber água desde que seja reduzida a carga que sobre elas actua.

Os principais factores controladores da expansibilidade são: a composição mineralógica da fracção argilosa, a concentração e natureza da solução e o arranjo textural.

A expansão das argilas é uma das evidências de que as moléculas de água são fortemente atraídas pelos minerais argilosos (Benta, 2007).

2.1.2.5 Plasticidade

Do ponto de vista geotécnico os solos podem existir em quatro estados diferentes em função do seu teor de água.

Um solo diz-se coesivo quando tem uma importante quantidade de minerais argilosos, pode apresentar 4 fases distintas: seco (sem água), à medida que lhe é adicionado água torna-se semi-sólido (friável), depois plástico e finalmente apresenta um comportamento líquido (Antão, 2007).

Os minerais argilosos são a principal causa da plasticidade das argilas, ou seja, quanto maior for o seu teor de minerais argilosos, maior será a sua plasticidade.

As argilas podem ser classificadas em função do seu limite de liquidez como mostra a Tabela 3.

Tabela 3- Classificação das argilas em função do limite de liquidez

| Descrição | Plasticidade | Varição do Limite de Liquidez (LL) (%) |
|-------------|----------------------------|--|
| Magra | Baixa plasticidade | <35 |
| Intermédia | Plasticidade intermédia | 35-50 |
| Gorda | Alta plasticidade | 50-70 |
| Muito Gorda | Plasticidade muito elevada | 70-90 |
| Extra Gorda | Plasticidade extra elevada | >90 |

Fonte: (Antão, 2007)

O intervalo de teores de água para o qual se observa comportamento plástico é traduzido pelo índice de plasticidade (IP).

O índice de plasticidade é a diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade, o qual se exprime em percentagem.

A Tabela 4 mostra a classificação dos solos quanto à plasticidade.

Tabela 4 – Classificação dos solos quanto à plasticidade

| Índice de Plasticidade (IP) % | Descrição |
|-------------------------------|------------------------|
| Menos de 1 | Não plástico |
| 1-7 | Ligeiramente plástico |
| 7-17 | Moderadamente plástico |
| 17-35 | Muito plástico |
| Mais de 35 | Extremamente plástico |

Adaptado de (Antão, 2007)

A plasticidade é afectada por factores tais como:

- Natureza das trocas iónicas;
- Cristalinidade dos minerais argilosos;
- Distribuição granulométrica;
- Teor de água;
- Natureza e concentração iónica das soluções intersticiais.

O parâmetro *actividade* representa quantitativamente a influência da fracção argilosa na plasticidade de um solo. Determina-se através de:

$$A = \frac{IP}{\% < 0.002mm}, (1)$$

É a proporcionalidade entre o índice de plasticidade de um solo e a percentagem em peso da respectiva fracção argilosa.

A Tabela 5 apresenta a classificação das argilas quanto à sua *actividade*.

Tabela 5 - Classificação das Argilas quanto à *actividade*

| Argila | A |
|--------------|-----------|
| Muito activa | >1.25 |
| Normal | 0.75-1.25 |
| Pouco activa | <0.75 |

Fonte: (Antão, 2007)

2.2 Aterros sanitários

Um aterro sanitário é uma modalidade de confinamento no solo no qual os resíduos são lançados ordenadamente e cobertos com terra ou material similar, existe ainda um controlo sistemático das águas lixiviantes e gases produzidos bem como a monitorização do impacte ambiental durante a operação e após o seu encerramento (Martinho & Gonçalves, 2000) .

Para ser classificado como tal, um aterro sanitário deve possuir:

- Vedação total;
- Cobertura diária de resíduos;
- Impermeabilização dos taludes e fundo;
- Drenagem, recolha, tratamento e posterior rejeição das águas lixiviantes;
- Drenagem de biogás;
- Plano de monitorização durante as fases de operação e pós- encerramento;
- Plano de recuperação pós-encerramento.

Nos itens seguintes dar-se-á particular ênfase à impermeabilização de aterros sanitários.

2.2.1 Impermeabilização de aterros sanitários

A metodologia a seguir na elaboração de um projecto de um aterro sanitário, deverá incluir em primeiro lugar a selecção de locais com aptidão para esse fim. Porém nem sempre tal acontece (Jesus & Costa, 1997).

A adequabilidade de um local para a instalação de um aterro sanitário é fortemente condicionada pelas suas características geológicas e hidrogeológicas. As formações geológicas podem agrupar-se em três classes principais de acordo o grau de adequabilidade que apresentam (Barroso, Ferreira, & Lemos).

Na Tabela 6 apresentam-se as classes, os intervalos de k , os tipos de solos e a adequabilidade do local.

Tabela 6 – Características dos locais mais indicados à construção de aterro sanitário

| Classe | Permeabilidade | Solos | Observações |
|------------|--|---|--|
| I | Baixa ($k < 10^{-9}$ m/s) | Argilas, xistos argilosos, margas, etc. | São as zonas mais indicadas. |
| II | Semipermeável ($10^{-6} < k < 10^{-9}$ m/s) | Solos areno-argilosos ou areno-siltosos | Devem ser tomadas medidas de modo a garantir que o aterro não causa problemas de ordem ambiental |
| III | Alta ($k > 10^{-6}$ m/s) | Seixos, rochas fracturadas | Devem ser evitadas estas zonas. |

Adaptado de: (Barroso, Ferreira, & Lemos)

Um sistema de impermeabilização depende do conceito de aterro sanitário adoptado. Os solos argilosos constituem os sistemas de impermeabilização naturais mais utilizados. Os principais factores que afectam a qualidade do tipo de impermeabilização são sobretudo a condutividade hidráulica, o grau de compactação, o teor de água, a composição do material, a técnica de colocação e a sua espessura (Lopes, 1997).

Os locais escolhidos apresentam terrenos de fundação constituídos por solos com elevada percentagem de elementos finos. Essa barreira natural, é complementarizada com um dispositivo de confinamento formado por combinações diversas de solos finos compactados, materiais artificiais (geosintéticos) e sistemas de drenagem (Santos, 1998).

O tratamento adequado do maciço de fundação e dos taludes, associado a um sistema de selagem eficiente, permite fazer fase a dois dos maiores problemas:

- Perigo de contaminação de solos e aquíferos por lixiviados;
- Perigo de explosões e de emanação de gases.

Trata-se de isolar os resíduos, conforme se apresenta de forma genérica e esquemática na Figura 11.

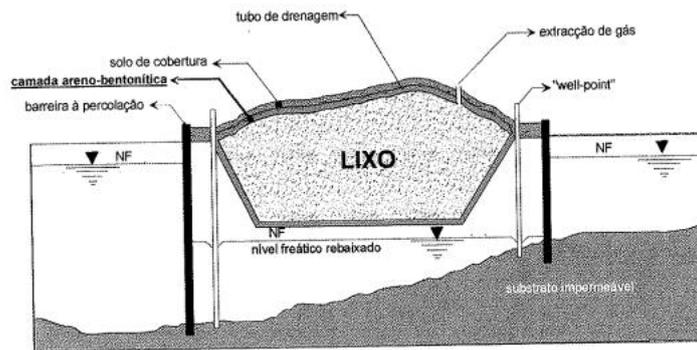


Figura 11 - Esquema simplificado de confinamento ou isolamento de aterro sanitário. Fonte: (Santos, 1998)

Os diferentes elementos que garantem o isolamento de um aterro sanitário têm que garantir estanqueidade relativamente a uma série de produtos. Terão que existir barreiras eficazes relativamente a todos eles. Essas barreiras são materializadas não só por elementos físicos e estruturais do próprio aterro, como também procedimentos assegurados em todas as fases da vida da obra (Santos, 1998).

A primeira superfície, relativamente à qual há necessidade de assegurar a impermeabilização, é a do substrato geológico, este deverá ser suficientemente impermeável para impedir a filtração. Há pois a necessidade de avaliar as discontinuidades existentes (fractura, falhas).

A barreira, consiste na intercalação de uma camada de argila, e/ou de uma geomembrana, que impeça o contacto da água do aterro com o substrato geológico.

2.2.2 Impermeabilização dos taludes e fundo

A impermeabilização dos aterros é garantida por uma “impermeabilização passiva”, conferida por uma camada mineral de baixa permeabilidade ($k < 10^{-9}$ m/s), colocada sobre o subsolo e por uma “impermeabilização activa”, constituída por uma geomembrana (Lopes, 1997).

É ainda necessária uma camada de drenagem para os lixiviados, bem como um filtro entre o dreno e os resíduos, para evitar a colmatção daquele (Santos, 1998).

As espessuras das diferentes camadas encontram-se estipuladas na legislação específica de cada país. A Figura 12 mostra a constituição das camadas usualmente utilizadas em Portugal.

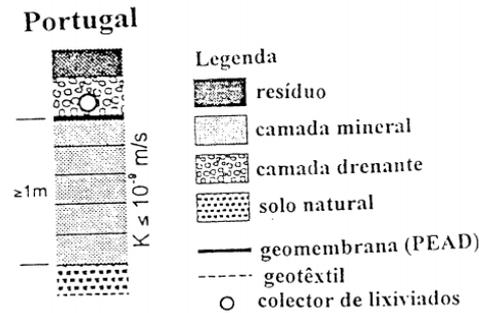


Figura 12- Exemplo de um sistema de impermeabilização de fundo e taludes. Adaptado de: (Lopes, 1997)

2.2.2.1 Impermeabilização de cobertura

Uma vez atingido o depósito de resíduos, deve-se realizar a sua cobertura final de modo a evitar a infiltração de água para o interior do aterro e permitir a sua recuperação paisagística.

Os materiais empregues devem apresentar características de deformabilidade e resistência adequadas às deformações que se vão verificar no seio do aterro (assentamentos) (Santos, 1998). A Figura 13, ilustra um sistema de cobertura habitualmente utilizado.

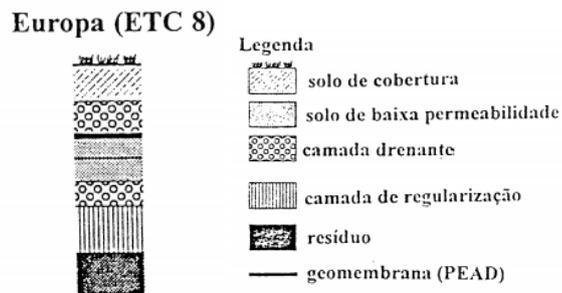


Figura 13 – Exemplo de sistema de impermeabilização de cobertura. Adaptado de (Lopes, 1997)

2.2.3 Caracterização dos materiais naturais

A selecção do dispositivo de selagem de um aterro sanitário deve obedecer a vários factores. Em primeiro lugar, há que atender ao tipo de resíduos a armazenar e ao posicionamento do nível freático.

A estanqueidade garantida pela selagem, por mais eficiente que seja, nunca será 100%, daí que haja a necessidade de se ser o mais exigente possível, dentro de critérios de viabilidade económica e técnica.

As características das formações geológicas são fundamentais no processo de selecção e do local e do material a utilizar. Pelo que na Tabela 7 se apresenta a síntese dos principais ensaios a realizar em laboratório, a fim de avaliar a adequabilidade do solo como barreira natural à percolação de gases e lixiviados.

Tabela 7 – Principais ensaios a realizar para a caracterização de materiais naturais de impermeabilização

| Ensaio | Parâmetros | Utilidade em projecto | Observações |
|---|---|---|--|
| Análise Granulométrica | Percentagem argila, silte, areia, cascalho | Aptidão do material | Identificação do solo |
| Limites de Atterberg | LL, LP, IP | Aptidão do material e modo de colocação | Quanto maior a plasticidade maior é a adequabilidade como impermeabilizante |
| Teor de humidade | W | Aptidão/Preparação do material | |
| Método do azul de metileno | Superfície específica | Avaliação das características de adsorção | |
| Capacidade de troca cationica | CTC (Meq/100g) | Avaliação das características de adsorção | Quanto maior for a capacidade de troca cationica do solo mais favorável ele é como barreira à percolação de gases e lixiviados |
| Permeabilidade | Coefficiente de permeabilidade (<i>k</i>) | Aptidão do material, controlo de qualidade, taxa de migração dos lixiviados | Valor de referência: $k < 10^{-9}$ m/s para espessura de subsolo de 3 metros |
| Ensaio de compactação | Curva de compactação: teor óptimo de humidade e peso especifico seco máximo | Aptidão do material, controlo de qualidade | Os solos devem ser compactados em camadas finas, com teores de água ligeiramente superiores ao optimo |
| Difracção raios x | Mineralogia | Aptidão do material | |
| Determinação do teor de matéria orgânica | % de matéria orgânica | | Não deve exceder os 5% |

Adaptado de: (Barroso, Ferreira, & Lemos) e (Santos, 1998)

3 Ensaio e metodologias

Neste capítulo pretende-se fazer uma breve descrição de toda a metodologia utilizada no decorrer dos ensaios, bem como as normas e especificações que se usaram. A Figura 14, expõe de uma forma simplificada os ensaios levados a cabo.



Figura 14 – Programa de ensaios

3.1 Prospecção e Amostragem

A deslocação ao barreiro para recolha de amostras decorreu no dia 21 de Abril de 2011. A colheita de amostras fez-se segundo as indicações da E218 (1968) do LNEC.

O barreiro permitiu o acesso directo aos locais de recolha de amostras, tendo-se identificado no local várias camadas que correspondiam, segundo nos foi informado, a argilas que eram processadas na fábrica para diferentes finalidades (tijolo, argila expandida, etc). A recolha de amostras remexidas de solo foi efectuada com uma colher e martelo, tendo-se também tentado recolher amostras intactas através de corte e remoção.

Nas Figuras 15 e 16 apresenta-se a localização da zona de recolha das amostras no barreiro.



Figura 15 – Localização no barreiro da zona de recolha das amostras P_0 e P_1



Figura 16 – Localização no barreiro da zona de recolha das amostras P_2 e P_3

A quantidade de solo a recolher para realização dos ensaios em laboratório é função do ensaio a que se destina. Recolheu-se uma quantidade adequada de amostras necessária para a realização dos ensaios.

Fez-se ainda a recolha de amostra com amostrador, o qual se cravou no solo com a ajuda de um martelo, como se pode visualizar na Figura 17. A extracção do amostrador requereu algum esforço.



Figura 17 – Recolha com amostrador

As dimensões do amostrador são: 73.7mm de diâmetro e 94.20mm de altura, o que perfaz um volume de 401.86cm³.

As restantes amostras foram embaladas em sacos de plástico fechados, devidamente identificadas com etiquetas (Figura18) e transportadas em caixas.



Figura 18- Acondicionamento das amostras simples e das amostras recolhidas com o amostrador

As amostras destinadas à determinação do teor de água foram envolvidas em *parafilme*, devidamente embaladas em sacos com zip e resguardadas dos raios solares.

As amostras foram devidamente identificadas, tendo-se anotado as coordenadas do local, a profundidade de recolha, o aspecto visual e o número de amostras recolhidas (Ver Anexo III).

Localização e colheita das amostras

Amostra P₀

A primeira amostra recolhida foi de um solo vermelho, à qual se atribuiu a identificação P₀. O local de recolha situa-se 3 metros abaixo do terreno, a uma cota aproximada de 84.7 metros. Possui 3 a 5 metros de espessura com pequenas intercalações de solo cinza-esverdeado. Visualmente aparenta ser um solo plástico (Ver Anexo IV - Foto 1).

Recolheu-se uma amostra para determinação do teor de água “*in situ*”, uma amostra com amostrador e duas amostras simples.

Amostra P₁

Ao solo cinzento atribuiu-se a identificação P₁. O local da recolha situava-se abaixo da camada fina de calcário, a uma cota aproximada de 67 metros. Aparenta ser um solo pouco plástico (Ver Anexo IV - Foto 2).

Recolheu-se uma amostra para determinação do teor de água e duas amostras simples.

Amostra P₂

Posteriormente procedeu-se à recolha do solo castanho, atribuindo-se a identificação P₂. O local de recolha situava-se a uma cota de 68 metros e aproximadamente a 20 metros acima do lago, local onde estavam a decorrer os trabalhos.

Aparentava ter uma plasticidade intermédia (Ver Anexo IV - Foto 3).. Recolheu-se uma amostra para determinação do teor de água e duas amostras simples.

Amostra P₃

Finalmente recolheu-se o solo vermelho acastanhado, identificado como P₃. A amostra foi recolhida a uma cota de 71.66 metros, situando-se acima da amostra P₂ e abaixo das amostras P₀ e P₁ (Ver Anexo IV - Foto 4).

Recolheu-se uma amostra para determinação do teor de água, duas amostras simples e uma amostra com amostrador.

3.2 Preparação por via seca das amostras

A preparação da amostra fez-se tendo por base a E195 (1966) do LNEC, a qual pretende fixar o modo de preparar as amostras de solo tal como são recebidas do campo. As amostras foram deixadas ao ar livre durante algum tempo de modo a secarem à temperatura ambiente, como mostra a Figura 19.



Figura 19 - Aspecto das amostras durante a secagem

Após a secagem, procedeu-se à desagregação dos torrões, sem reduzir o tamanho individual das partículas. Para tal utilizou-se o almofariz e pilão revestido de borracha apresentado na Figura 20. Seguidamente peneiraram-se no peneiro nº40 (0.425mm).



Figura 20 – Processo de desagregação dos torrões e peneiração

Dada dureza das amostras de solo e a dificuldade do procedimento anterior, optou-se pela utilização do Equipamento utilizado para o desgaste de Los Angeles (Figura 21) para proceder à fragmentação das amostras não estando dispensada a utilização do almofariz e pilão posteriormente.



Figura 21- Equipamento utilizado no Desgaste de Los Angeles

3.3 Determinação do teor em água

Utilizou-se a NP 84 (1965). O teor de água de uma amostra de solo é o quociente da massa de água que evapora a uma temperatura compreendida entre 105°C e 110°C, pela massa do provete depois de seco e expressa-se em percentagem

Nos vários ensaios realizados foi usual a determinação do teor de água sendo que se utilizou uma massa de provete entre 25 a 30g.

A permanência da amostra na estufa foi sempre superior a 24 horas sendo posteriormente arrefecidas num exsicador com sílica gel.

O teor de água foi determinado a partir da seguinte expressão:

$$W (\%) = \frac{ma}{ms} * 100, (2)$$

sendo ma a massa de água e ms a massa de solo seco.

3.4 Determinação dos limites de consistência

3.4.1 Limite de liquidez

A determinação do limite de liquidez é feita geralmente utilizando-se a concha de Casagrande (NP-143, 1969), podendo ser utilizada em alternativa o cone penetrométrico segundo a norma Inglesa (BS 1377: Part 2, 1990).

Seguidamente apresenta-se a metodologia de cada uma das normas.

3.4.1.1 Norma Portuguesa - 143, (1969)

Entende-se por limite de liquidez o teor de água mínimo para o qual o solo flui sob a acção do seu próprio peso.

Começou por se tomar 100g de amostra, passada no peneiro de malha quadrada de 0.425mm de abertura, peneiro nº 40 da ASTM.

Amassou-se à espátula, com água destilada até formar uma pasta homogénea e consistente como apresentado na Figura 22.



Figura 22 – Pasta homogénea amostra P₁

Em solos argilosos é aconselhável deixar a pasta húmida em repouso para que a humidade se distribua uniformemente, como tal deixou-se em repouso durante 24 horas.

Antes do início do ensaio procedeu-se à calibração da altura de queda da concha e ao treino de modo a realizar 30 voltas em 15 segundos.

Recorreu-se à concha de Casagrande e preencheu-se com a pasta de solo até formar uma camada não muito comprida, com a espessura aproximada de 1cm e superfície nivelada com a espátula.

Fez-se um sulco deslocando o riscador segundo o diâmetro da concha e mantendo-o perpendicular à superfície.

Com o auxílio da manivela fez-se subir e cair a concha da altura de 1cm, a um certo ritmo, 2 voltas por segundo, até o sulco fechar, como mostra a Figura 23.



Figura 23 - Ensaio terminado com sulco fechado

Retirou-se com a espátula, cerca de 10g da zona do sulco em que se deu a união e procedeu-se à determinação do teor de água.

Devem efectuar-se 4 provetes com vários teores em água. Estes devem ser escolhidos de modo a que o número de pancadas necessárias para unir os bordos dos sulcos varie entre 10 e 40, e se distribuam, em dois ensaios abaixo de 25, e dois acima. Para tal fez-se a adição de mais água ou mais solo conforme o conveniente.

Anotou-se o número de pancadas correspondente a cada um dos ensaios. Após obtenção dos teores em água, traçou-se a curva relacionando o teor em água de cada um dos provetes com o correspondente número de pancadas.

O limite de liquidez da amostra ensaiada é dado pelo teor de humidade correspondente a 25 pancadas, obtido por interpolação na curva traçada.

3.4.1.2 British Standards 1377: part 2. Ensaios de classificação

Este método utiliza o cone penetrômetro, o qual se baseia na queda programada de um cone compacto sobre a amostra (Figura 24).

As características do cone são: 30mm comprimento, e ângulo de 30°. O peso da estrutura é de aproximadamente 80g.



Figura 24 - Ensaio do cone penetrométrico

Tomaram-se 100g de amostra, passada no peneiro de malha quadrada de 0.425mm de abertura, peneiro nº 40 da ASTM, amassou-se à espátula, com água destilada até formar uma pasta homogénea e deixou-se em repouso.

Encheu-se o recipiente com a ajuda de uma espátula com o cuidado de preencher devidamente todos os espaços, retiraram-se os excessos e alisou-se a superfície.

Programou-se o temporizador para um período de 5 segundos e colocou-se o recipiente por baixo do cone localizado na posição de ensaio, ao nível da superfície.

Iniciou-se o ensaio e após os 5 segundos observou-se a queda do cone e consequente penetração, como mostra a Figura 25.



Figura 25- Determinação do limite de liquidez através do cone amostra P₁

Anotou-se a penetração, em mm, que atingiu o cone. Com a ajuda da espátula retirou-se da zona onde o cone penetrou cerca de 10g e procedeu-se à determinação do teor em água.

Efectuaram-se 4 provetes para cada amostra, sendo que 2 deles deviam obter uma penetração superior a 20mm e 2 abaixo. Para tal adicionou-se mais solo ou mais água consoante o efeito pretendido.

Posteriormente traçou-se o gráfico relacionando o teor em água em % com a penetração em mm.

O limite de liquidez da amostra ensaiada obtém-se para uma penetração de 20mm, fazendo uma interpolação através do gráfico referido anteriormente.

3.4.2 Limite de Plasticidade

A determinação do limite de plasticidade fez-se apenas recorrendo à NP-143 (1969).

O índice de plasticidade (IP) de uma amostra de solo é a média dos teores de água de quatro provetes da amostra, cada um dos quais é o maior teor em água com que se rompe cada provete ao pretender-se transformar num filamento cilíndrico com cerca de 3mm de diâmetro, por rolagem entre a palma da mão e uma placa de vidro (Figura 26).



Figura 26 – Comparação do filamento com uma carga de esferográfica de 3mm de diâmetro

Tomaram-se 20g de cada amostra, passada no peneiro de malha quadrada de 0.425mm de abertura, que se amassaram com água destilada até a massa se tornar suficientemente plástica permitindo a moldagem de pequenas esferas de diâmetro sensivelmente igual.

Posteriormente rolou-se a esfera entre a palma da mão e a placa de vidro, de modo a transformar a esfera num filamento cilíndrico.

Quando o diâmetro do filamento atingiu os 3mm voltou a transformar-se numa esfera e rolou-se como referido anteriormente. Estas operações efectuaram-se até que, devido à progressiva secagem, se deu a rotura dos filamentos.

Após a rotura procedeu-se à determinação do teor em água dos filamentos e respectivas médias de modo a obter o limite de liquidez de cada uma das amostras.

É ainda de salientar que se efectuaram apenas dois provetes de cada amostra.

3.5 Determinação da densidade das partículas

A densidade das partículas de um solo é definida como o quociente da massa de um dado volume dessas partículas à temperatura do ensaio, pela massa de igual volume de água destilada à temperatura de 20°C. Para a sua determinação usou-se a NP 83 (1965).

A calibração dos picnómetros efectuou-se pesando o picnómetro seco (m_1), de seguida encheu-se de água destilada até ao traço de referência e voltou a pesar-se (m_2). Anotou-se a temperatura de calibração (t_1).

A massa do picnómetro (m_3) à temperatura observada é dada por:

$$m_3 = \frac{dt_x}{dt_1} * (m_2 - m_1) + m_1, (3)$$

O solo utilizado neste ensaio é o passado no peneiro de malha quadrada de 0.425mm de abertura, peneiro nº 40 da ASTM.

Efectuou-se a secagem prévia do provete, cerca de 60g, na estufa a uma temperatura entre 105 e 110 °C durante aproximadamente 24 horas. Realizaram-se dois ensaios a cada amostra.

Após arrefecimento no exsiccador, introduziu-se metade do conteúdo referido anteriormente em cada um dos picnómetros e pesou-se (m_4), encheu-se o com água destilada até três quartos da sua capacidade (Figura 27).



Figura 27 – Amostras nos picnómetros

O ar foi extraído por ebulição e agitação durante cerca de 10 minutos. Deixou-se em repouso até se atingir a temperatura ambiente (aproximadamente 24h).

Preencheu-se com água destilada até ao traço de referência, pesou-se (m_5).

A densidade das partículas, à temperatura t_x , em relação à da água destilada a 20°C é dada por:

$$d^{t_x}_{20} = \frac{m_4}{m_3 - (m_5 - m_4)} * k, (4)$$

3.6 Análise Granulométrica

A análise granulométrica permite determinar quantitativamente a distribuição por tamanhos das partículas que constituem um solo, existindo a E196 (1967) e a E239 (1970) para a sua determinação. É expressa em percentagens acumuladas e em escala semi logarítmica. (E 196, 1967)

A E239 (1970) permite apenas determinar quantitativamente a distribuição por tamanhos das partículas de um solo retidas no peneiro de 0.074 (nº200) da ASTM e a percentagem passada através dele, não sendo possível determinar a distribuição das partículas com tamanho inferior a 0.074mm. Como tal recorreu-se à E196 (1967), a qual engloba os dois processos: peneiração e sedimentação.

3.6.1 Peneiração

Na peneiração o solo é obrigado a passar por uma serie de peneiros de malha quadrada normalizada e cada vez mais apertada. O material retido num peneiro representa

a fracção de solo com dimensão superior à malha desse peneiro, mas inferior à do peneiro precedente. Esse material é pesado para averiguar que percentagem representa do peso total da amostra.

Tratando-se as amostras de solos com baixo teor de matéria orgânica e com compostos de cálcio foi necessário um pré tratamento.

Para tal, colocou-se o solo num frasco de Erlenmeyer de boca larga e juntaram-se 100ml de ácido clorídrico, que se mexeram durante alguns minutos com uma vareta, deixou-se repousar durante algum tempo. Colocou-se num prato de porcelana e levou-se à estufa.

Após secagem, colocou-se a amostra no almofariz e promoveu-se o desagregamento do solo, pesou-se.

É essencial que o solo esteja convenientemente desfloculado, isto é, que as partículas estejam separadas umas das outras não formando flocos. Para promover a desfloculação utilizou-se uma solução de hexametáfosfato de sódio, na proporção de 6,6g de hexametáfosfato de sódio por 100ml de água.

Juntaram-se 100ml da solução de antifloculante à amostra referida anteriormente que se aqueceu durante cerca de 10min.

Transferiu-se a amostra para o copo do agitador, tendo o cuidado de transferir todo o conteúdo, com ajuda de água destilada, colocou-se o agitador em funcionamento por um período de 15min.

Findo esse período, transferiu-se a suspensão para o peneiro nº 200 (0.074mm) e base, tendo-se o cuidado de transferir todos os resíduos da suspensão do copo e das varetas do agitador.

Lavou-se o solo no peneiro com água destilada de modo a que as partículas de tamanho menor que 0.074mm ainda retidas no peneiro, passassem para a suspensão da base.

O peneiro foi colocado na estufa a uma temperatura de 105-110°C até massa constante, aproximadamente 24h.

Após secagem procedeu-se à peneiração foi feita através dos peneiros: 0.425mm (nº40), 0.250mm (nº60), 0.106mm (nº140) e 0.074mm (nº200), da ASTM, ordenados por ordem decrescente de tamanho da malha.

Pesaram-se os peneiros com as fracções retidas em cada um, determinou-se a massa retida.

A percentagem de solo retido em cada peneiro é dada por:

$$n'x = \frac{mx}{mb} * 100, (5)$$

onde mx é massa retida em cada peneiro e mb a massa de solo após pré-tratamento.

A percentagem acumulada passada, $n''x$, corresponde à diferença entre 100% e a percentagem retida acumulada.

A percentagem do material, $N''x$, que passa em cada peneiro, em relação à massa total da amostra, é dada por:

$$N''x = n''x * \frac{100 - N'10}{100}, (6)$$

Onde, $n''x$ é a percentagem cumulada passada e $N'10$ corresponde à percentagem de material retido no peneiro de malha 2mm, nº 10.

Neste caso a percentagem retida no peneiro nº 10 é zero.

No Anexo VI, apresenta-se o exemplo folha de cálculo utilizado para determinar as percentagens das diferentes fracções constituintes do solo por peneiração.

3.6.2 Sedimentação

Para partículas de dimensões inferiores a 0.074mm a análise granulométrica é determinada a partir da velocidade de queda das partículas do solo, através da lei de Stokes, determinando-se a diferentes intervalos de tempo a sua velocidade de queda.

A suspensão que passou no peneiro de malha 0.074mm (nº200) foi transferida para a proveta e misturada com água destilada até à marca de 1000cm³.

Previamente procedeu-se à calibração do densímetro com a proveta utilizada, conforme apresentado no Anexo V.

Tapou-se a boca da proveta e agitou-se. Assim que se terminou esta operação colocou-se a proveta na bancada, no momento em que se introduziu o densímetro da proveta (Figura 28) colocou-se o cronómetro em funcionamento.



Figura 28 - Colocação do densímetro na proveta

Efectuaram-se leituras com o densímetro (L_s) (Figura 29) aos: 1min, 2min, 5min, 15min, 30min, 60min, 250min, 1440min e 2880min.



Figura 29 - Leitura com o densímetro

A inserção e remoção do densímetro da proveta requereram algum cuidado, de modo a não perturbar a suspensão.

Registou-se a hora de início do ensaio, a leitura do densímetro e mediu-se a temperatura a cada leitura.

Foi necessário calcular a correcção da temperatura C_T , bem como a correcção do antifloculante (CA). Este determina-se da seguinte forma:

$$CA = LA - C_T, (7)$$

onde LA corresponde à leitura do densímetro na temperatura em questão.

A leitura corrigida (L_C) determina-se a partir da leitura directa do densímetro, da correcção do menisco, correcção do antifloculante e correcção da temperatura:

$$L_C = L_S + C_M - CA + C_T, (8)$$

A percentagem de particular de diâmetro inferior a D, $n_{D, \epsilon}$ dada por:

$$n_D = \left(\frac{100000}{mb} * \frac{G}{G-1} \right) * (L_C - 1), (9)$$

onde, G é a densidade das partículas, mb a massa seca após pré-tratamento, e L_C a leitura corrigida do densímetro.

O diâmetro das partículas, em milímetros, determinado a partir da Lei de Stokes, obtém-se a partir da seguinte equação:

$$D = k \sqrt{\frac{Z_s}{t}}, (10)$$

Onde, k varia em função da temperatura e da densidade das partículas, Z_s é a distância do nível da suspensão ao centro de impulsão do densímetro e t o intervalo de tempo, em minutos, medido desde o início da sedimentação até à leitura do densímetro. No Anexo VII, apresenta-se o exemplo folha de cálculo utilizado, bem como todos os parâmetros referidos anteriormente, para determinar as percentagens e os diâmetros das fracções analisadas pelo processo de sedimentação.

3.7 Determinação da quantidade de azul de metileno e da actividade dos solos

O ensaio pelo método da mancha foi realizado segundo a NF 94-068- Sols: reconnaissance et essais – Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse, (Ver Anexo IX), a norma foi devidamente traduzida para português (Ver Anexo X), visto não existir qualquer norma portuguesa para esse efeito.

A adsorção do azul de metileno pelos materiais argilosos permite medir a sua superfície hidrófila e deste modo, avaliar a capacidade que estes minerais possuem para fixar água bem como o tipo e teor de materiais presentes.

O princípio do ensaio consiste em introduzir quantidades sucessivas de azul-de-metileno até saturar as partículas argilosas.

Começou por se preparar a solução de azul de metileno, 10g/L.

Utilizou-se azul de metileno, com a formula $C_{16}H_{18}ClN_3S \cdot nH_2O$ (n+2 a 3), com grau de pureza $\geq 98,5\%$, comercializado com o nome de "Azul de Metileno puro para análises medicinais", sobre a forma de pó.

Determinou-se o teor de água do azul de metileno.

Aqueceram-se 900g de água destilada a uma temperatura de 50°C, pesaram-se 10g de azul de metileno que posteriormente se introduziram na água. Agitou-se até se completar a dissolução.

Deixou-se arrefecer e completou-se a solução com água destilada até atingir 1010g. A solução armazenou-se num frasco de vidro escuro.

A fracção argilosa utilizada neste ensaio foi a passada no peneiro de malha quadrada de 0.075mm de abertura, peneiro nº 200 da ASTM.

Na primeira amostra (P_0) utilizaram-se 15g da fracção referida anteriormente, nas restantes apenas 10g (m_0).

Colocou-se a amostra num recipiente e colocou-se em suspensão com 500ml de água destilada, a qual se dispersou com a ajuda de um agitador durante 5 minutos.

Com a ajuda da pipeta começou por se introduzir 10ml da solução de azul no preparado referido. Aguardou-se um minuto.

Com a ajuda da vareta de vidro retirou-se uma gota da suspensão e depositou-se sobre o papel de filtro.

Caso não existisse auréola, o ensaio prosseguia com sucessivas adições de 5 a 10ml de azul, até que aparecesse a auréola azul clara na zona húmida periférica da mancha.

Quando à volta da gota apareceu a auréola azul clara o teste foi dado com positivo. A partir desse momento aguardou-se que a absorção de azul continuasse, tendo-se retirado gotas da solução de minuto a minuto, até ao fim de 5 minutos, sem adição de mais solução.

Se ao quinto minuto a auréola permanecer o ensaio é dado como terminado, caso contrário, ter-se-ia que introduzir mais solução e repetir o processo.

Quando o ensaio foi dado como terminado anotou-se o volume da solução de azul de metileno introduzida na suspensão.

O valor de azul de metileno do solo exprime-se em gramas de azul por 100g de solo e é dado por:

$$VBS = \frac{B}{m_0} * 100, (11)$$

onde B é a massa de azul introduzido, em gramas dado por $B = V * 0.01$.

3.8 Determinação da Permeabilidade

A permeabilidade à água é a propriedade que os solos têm de permitir o escoamento de água através dos seus vazios. A sua avaliação é feita através do coeficiente de permeabilidade.

O coeficiente de permeabilidade pode ser determinado directamente através de ensaios de campo e laboratório ou indirectamente utilizando correlações empíricas.

Existem diversos tipos de equipamentos para a investigação de solos em laboratório. Estes equipamentos são denominados permeâmetros. Em função do método de execução

os ensaios podem ser denominados como ensaio de carga constante e ensaio de carga variável.

Dadas as características dos solos em estudo optou-se pela utilização do ensaio de carga variável.

O equipamento utilizado para a determinação do coeficiente de carga variável (Figura 30) passa a descrever-se de seguida.

O permeâmetro é constituído por: uma base perfurada e com 3 hastes onde encaixa um cilindro (onde é colocado o solo), sobre este é colocada uma tampa. A tampa é ligada através de um tubo plástico a um tubo de diâmetro variável (0.4, 0.7 e 1cm). Ao lado do tubo manométrico é colocada uma régua a qual permite determinar as diferenças de altura de água quando o ensaio estiver a decorrer.

Ao abrir a torneira promove-se o enchimento do reservatório. Através da válvula promove-se o enchimento do tubo manométrico até à altura pretendida.

No ensaio de permeabilidade a carga variável, mede-se a diferença de altura obtidas para diversos valores de tempo decorrido desde o início do ensaio.



Figura 30 - Equipamento utilizado para determinação do coeficiente de permeabilidade de carga variável

O coeficiente de permeabilidade (k) é calculado aplicando a Lei de Darcy:

$$k = \frac{a \cdot L \cdot \ln(\Delta h)}{A \cdot \Delta T}, \quad (12)$$

onde, a é a área interna do tubo de carga (cm^2), A secção transversal da amostra (cm^2), L altura do permeâmetro, Δh a diferença de alturas (cm), ΔT o intervalo de tempo em segundos.

Através de correlações empíricas o coeficiente de permeabilidade pode ser determinado indirectamente através das expressões de Hazen e Terzaghi.

Hazen propôs a proporcionalidade de k em relação ao diâmetro efectivo:

$$k(\text{m/s}) = C_1 D_{10}^2, \quad (13)$$

onde D_{10} (m) é determinado através da curva granulométrica e C_1 é da ordem de 10000.

Por outro lado, Terzaghi faz depender k do índice de vazios, através da expressão:

$$k(\text{m/s}) = 20000 e^2 D_{10}^2, \quad (14)$$

onde, e é o índice de vazios.

O coeficiente de permeabilidade é função de diversos factores, dentre os quais podemos citar: granulometria, grau de saturação, índice de vazios e a temperatura a que o ensaio é realizado.

A percolação da água não remove todo o ar existente num solo não saturado, permanecendo bolhas de ar retidas pela tensão superficial da água, as quais constituem obstáculos ao fluxo de água. Desta forma, o coeficiente de permeabilidade do solo não saturado é menor que o que ele apresentaria se estivesse totalmente saturado.

A permeabilidade dos solos está relacionada com o índice de vazios, logo com a sua porosidade. Quanto mais poroso for um solo (maior a dimensão dos poros), maior será o índice de vazios, por conseguinte maior permeabilidade terá.

Em relação à temperatura, quanto maior for a temperatura, menor é a viscosidade da água e mais facilmente escoam pelos vazios do solo, conseqüentemente há um aumento de coeficiente de permeabilidade.

4 Resultados e Discussão

4.1 Características “in situ”

Para avaliar o teor de água “in situ” teve-se o cuidado de proteger as amostras com *parafilme* e transporta-las de modo a conservar as suas características. A determinação do teor em água fez-se no mesmo dia da recolha das amostras. A amostra P_{3Am.} refere-se ao teor de água da amostra transportada no amostrador.

Como se pode verificar na Tabela 9, o solo com maior teor em água, aproximadamente 39%, é o da amostra P₀. O teor em água da amostra P₁ e P₂ ronda os 20%, sendo que a amostra que apresenta um menor teor em água “in situ” é a amostra P₃ com 18%. A discrepância entre os valores obtidos para a amostra P₃ e P_{3Am.} deve-se ao facto de a amostra P_{3Am.} ter sido recolhida num local diferente da P₃.

A baridade (γ) “in situ” foi determinada com o amostrador, através da expressão:

$$\gamma = \frac{P}{V}, (15)$$

Foi apenas avaliar este parâmetro nas amostras recolhidas com amostrador. O volume do amostrador é de 401.86cm³.

A baridade seca (γ_d) corresponde:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{(1+(w/100))}, (16)$$

O índice de vazios dado por:

$$e = \frac{G_s * 9.81}{\gamma_d - 1}, (17)$$

onde, G_s é a densidade das partículas e γ_d a baridade seca.

Só foi possível determinar o índice de vazios após a determinação da densidade das partículas.

Obteve-se um índice de vazios de 1.16 para a amostra P₀ e de 0.92 para a amostra P_{3Am.}, este parâmetro é adimensional.

O grau de saturação, em %, é dado por:

$$Sr = \frac{G_s * (\frac{w}{100})}{e * 100}, (18)$$

onde, G_s é a densidade das partículas, w o teor em água e e o índice de vazios.

Para a amostra P₀ obteve-se um grau de saturação de 90.54% e para a amostra P_{3Am.} de 78.16%.

Na Tabela 8 apresentam-se os valores obtidos para os parâmetros referidos anteriormente.

Tabela 8- Características das amostras "in situ"

| | W (%) | γ (kN/m ³) | γ_d (kN/m ³) | e | Sr (%) |
|--------------------|-------|-------------------------------|---------------------------------|------|--------|
| P ₀ | 38.71 | 17.08 | 12.32 | 1.16 | 90.54 |
| P ₁ | 20.88 | - | - | - | - |
| P ₂ | 20.08 | - | - | - | - |
| P ₃ | 18.24 | - | - | - | - |
| P _{3 am.} | 27.13 | 17.21 | 13.54 | 0.92 | 78.16 |

4.2 Determinação dos limites de consistência

4.2.1 NP-143

Seguindo a norma portuguesa e relacionando o teor em água com o numero de golpes obtidos em cada ensaio, obteve-se o seguinte gráfico:

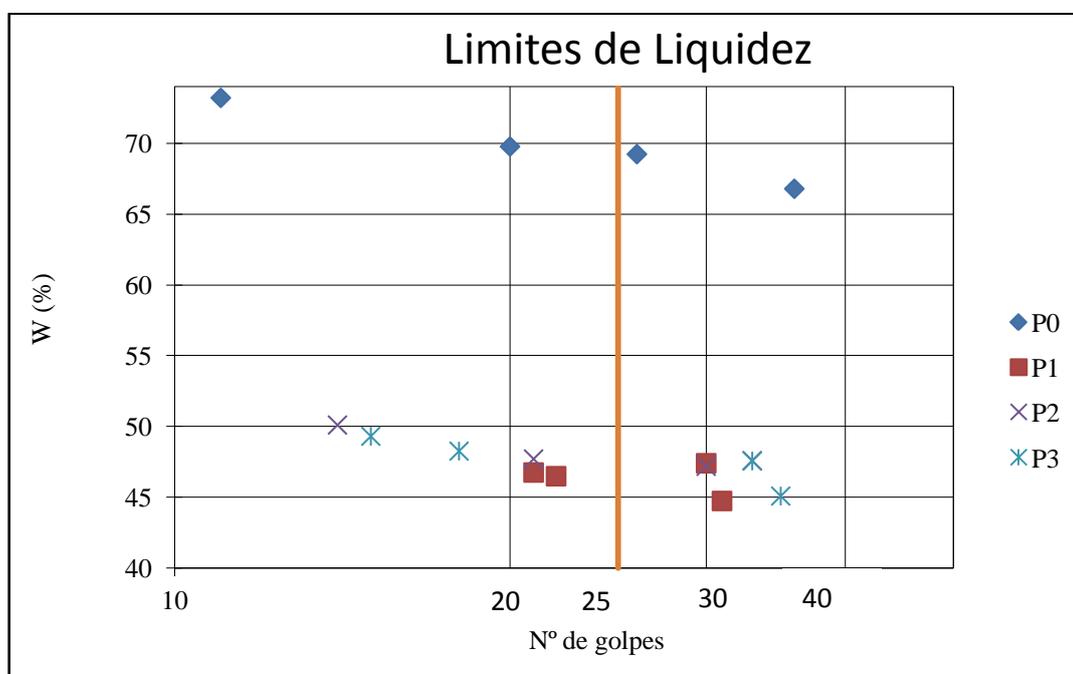


Gráfico 1- Relação entre o número de golpes e o teor de água das amostras

Com referido na norma, teve se o cuidado de obter dois golpes acima dos 25 e dois a baixo.

4.2.2 BS 1377

Após a realização do ensaio, seguindo a respectiva norma, e determinação do teor em água das amostras obteve-se o Gráfico 2, relacionando o teor em água das amostras e a penetração que o cone atingiu.

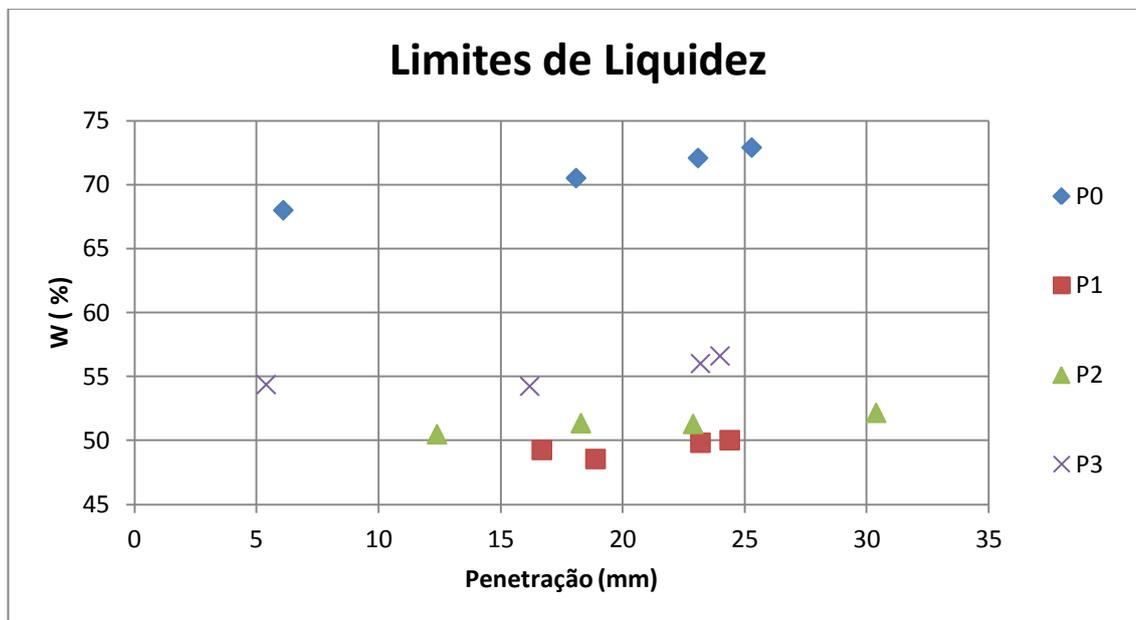


Gráfico 2 - Relação entre a penetração e o teor em água das amostras

Teve-se o cuidado de durante o ensaio proporcionar as condições para obter dois valores acima dos 20mm de penetração e dois abaixo. Para tal, por tentativas, procedeu-se à adição de água ou solo consoante o efeito pretendido. Os limites de liquidez obtiveram-se fazendo a interpolação das rectas de tendência obtidas gráficas com o valor de 20mm de penetração.

Os valores obtidos através das duas normas apresentam-se na tabela 9.

Tabela 9 – Valores obtidos pelos dois métodos

| | LL(%) | LP (%) | IP (%) |
|----------------------|-------|--------|--------|
| P₀ | | | |
| i | 69 | 47 | 22 |
| ii | 71 | | 24 |
| P₁ | | | |
| i | 46 | 35 | 11 |
| ii | 49 | | 14 |

| | | | |
|----------------------|----|----|----|
| P₂ | | | |
| i | 48 | 37 | 11 |
| ii | 51 | | 14 |
| P₃ | | | |
| i | 48 | 36 | 12 |
| ii | 55 | | 19 |

Nota: i – Valores obtidos pela NP-143 (1969) ii – Valores obtidos pela BS-1377

O solo P₀ classifica-se como *muito plástico* e os restantes como *moderadamente plásticos*.

4.2.3 Comparação entre a Norma Portuguesa e a Norma Inglesa

Verificou-se que a utilização do cone penetrómetro apresenta algumas vantagens relativamente ao uso da concha de Casagrande. As quais se passam a citar: é mais rápido e prático, menos sujeito às influências do operador e confere maior precisão aos resultados obtidos.

É ainda de salientar que os valores obtidos para os limites de liquidez através do método do cone são relativamente superiores aos obtidos pelo método da concha de Casagrande.

A amostra com a qual se teve maior dificuldade de manuseamento, quer por um método quer pelo outro, foi a P₁.

4.3 Determinação da densidade das partículas

As densidades das partículas, à temperatura tx, em relação à da água destilada a 20°C, das amostras apresentam-se na Tabela 10.

Tabela 10- Densidade média das partículas

| Amostra | Densidade média das partículas (Gs) |
|----------------|-------------------------------------|
| P ₀ | 2.71 |
| P ₁ | 2.66 |
| P ₂ | 2.67 |
| P ₃ | 2.68 |

4.4 Análise Granulométrica

A curva Granulométrica relaciona a percentagem de material que passa em cada peneiro numa escala aritmética com a abertura do peneiro numa escala logarítmica.

A Sociedade Internacional da Ciência do solo recomenda os seguintes valores para as principais classes Granulométricas:

Tabela 11 – Classes granulométricas

| Designação | Diâmetro (mm) |
|-----------------|---------------|
| Areia grossa | 0.6 – 2 |
| Areia média | 0.2 – 0.6 |
| Areia fina | 0.06 – 0.2 |
| Silte grosseiro | 0.02 – 0.06 |
| Silte médio | 0.006 – 0.02 |
| Silte fino | 0.002 – 0.006 |
| Argila | <0.002 |

Adaptado de (Antão, 2007)

Por sua vez em geotecnia é usual utilizar a classificação apresentada na Tabela 12. Para uma melhor classificação é ainda útil utilizar todos os parâmetros definidos no Anexo VIII .

Tabela 12 – Classificação geotécnica

| Símbolo do grupo | Nome do grupo |
|------------------|-----------------------------------|
| SM | Areia Siltosa |
| SC | Areia argilosa |
| CL | Argila magra |
| ML | Silte |
| OL | Argila orgânica ou silte orgânico |
| CH | Argila gorda |
| MH | Silte elástico |

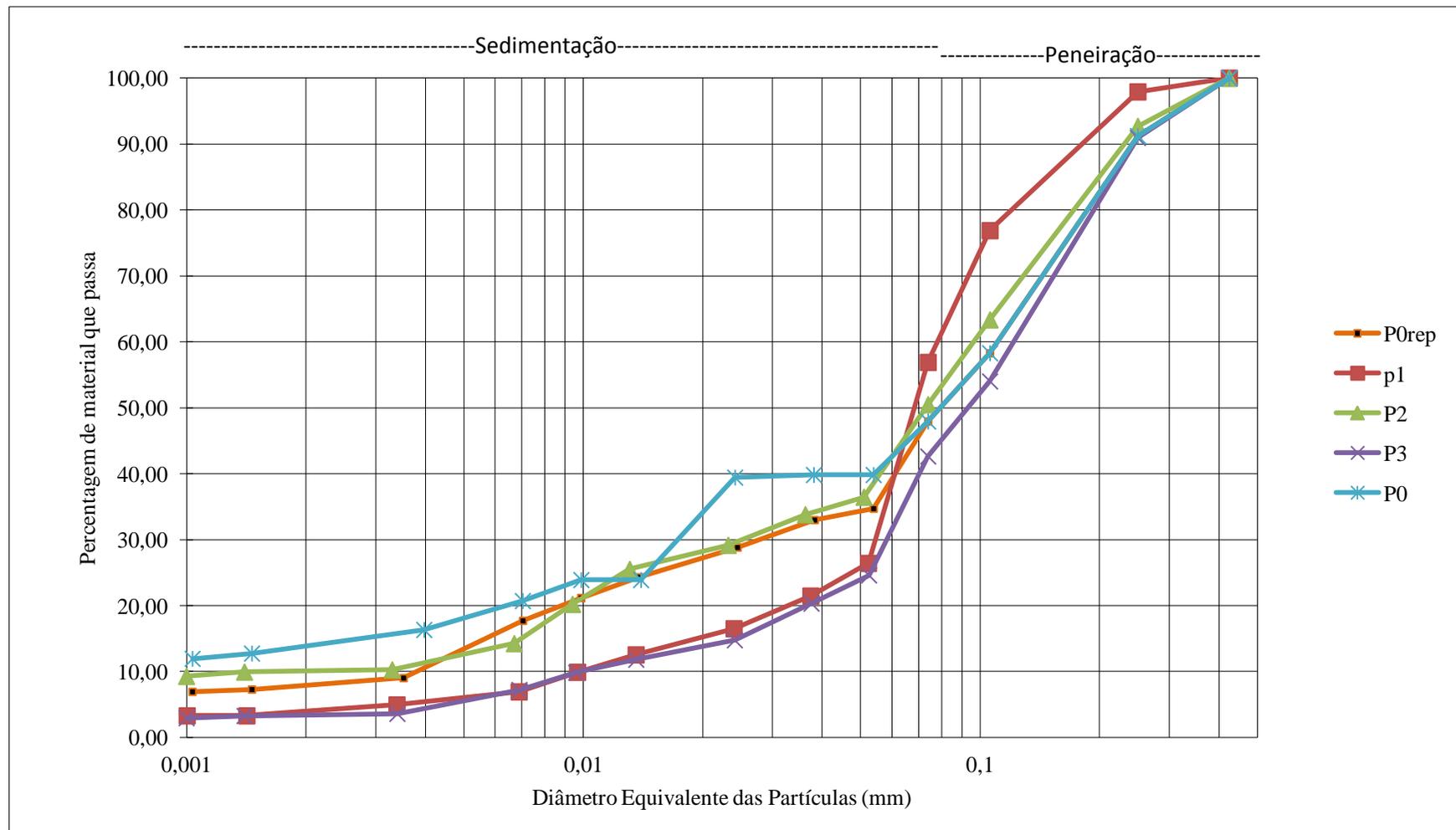


Gráfico 3- Curvas granulométricas das amostras

No Gráfico 3 incluem-se os valores obtidos através de peneiração e sedimentação para cada amostra, respectivamente. Relativamente à amostra P₀ foi necessário repetir o ensaio (P_{0rep.}) dada a existência de um sobreaquecimento indevido da amostra na estufa durante o pré – tratamento. Como tal apresentam-se as curvas obtidas em ambos os casos. Para as restantes amostras realizou-se apenas um ensaio.

Através da análise das curvas granulométricas (Gráfico 3) é possível determinar as percentagens correspondentes a cada uma das classes granulométricas, como mostra a Tabela 13.

Tabela 13 - Composição Granulométrica das amostras

| | P₀ | P_{0rep} | P₁ | P₂ | P₃ |
|-------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Areia (%) | 52 | 52 | 42 | 52 | 58 |
| Silte (%) | 35 | 40 | 54 | 38 | 38 |
| Argila (%) | 13 | 8 | 4 | 10 | 4 |

Sendo que a percentagem de areia corresponde à fracção superior a 0.075mm, a do silte à fracção compreendida entre 0.075mm e 0.002mm e a da argila à fracção inferior a 0.002mm.

Como se pode verificar as maiores percentagens correspondem aos siltes e às areias, sendo as de argila as menores, no entanto é esta que confere ao solo as suas propriedades particulares.

É ainda possível obter parâmetros como o coeficiente de uniformidade e o coeficiente de curvatura.

O coeficiente de uniformidade dá uma ideia da variedade de dimensões que as partículas de um solo possuem.

O coeficiente de uniformidade, C_u é dado por:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}, (19)$$

Quanto maior for o C_u maior será a variação e a o solo diz-se bem graduado. Se o C_u for baixo diz-se mal graduado e por outro lado se for próximo da unidade diz-se uniforme.

O coeficiente de curvatura é dado por:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}}, \quad (20)$$

Onde D_{10} , D_{30} e D_{60} são os diâmetros correspondentes a, respectivamente, 10%, 30% e 60% de passados.

Após análise das curvas granulométricas foi possível obter os valores referidos anteriormente e calcular os coeficientes referidos, os quais se apresentam na Tabela 14.

Tabela 14 - Coeficiente de uniformidade e coeficiente de curvatura das amostras

| | P₀ | P_{0rep} | P₁ | P₂ | P₃ |
|----------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| D₁₀ (mm) | 0 | 0.004 | 0.0095 | 0.0033 | 0.0095 |
| D₃₀ (mm) | 0.015 | 0.028 | 0.065 | 0.025 | 0.07 |
| D₆₀ (mm) | 0.12 | 0.12 | 0.079 | 0.09 | 0.15 |
| C_u | - | 30 | 8.32 | 27.27 | 15.79 |
| C_c | - | 1.63 | 5.63 | 2.10 | 3.44 |

Como se pode verificar a amostra P_0 não atinge os 10% de passados, logo não é possível calcular o C_u e C_c .

As principais dificuldades encontradas no decorrer deste ensaio foram:

- Dificuldade em assegurar a completa dispersão das partículas individuais do solo.
- Susceptibilidade de ocorrência de erros nas leituras do densímetro e durante as várias pesagens.
- O procedimento é algo moroso.

4.4.1 Classificação das amostras

4.4.1.1 Localização das amostras na carta de plasticidade

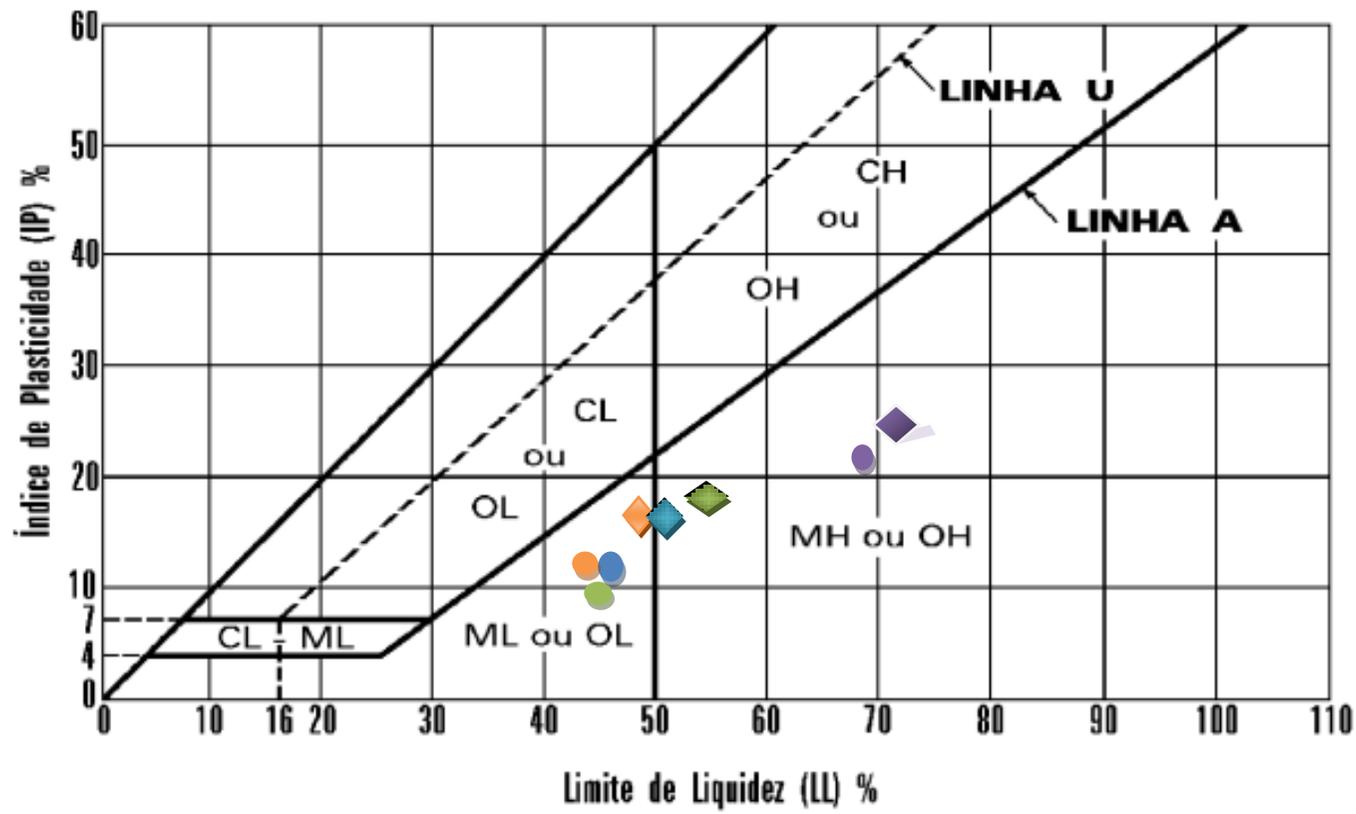
A classificação dos solos faz-se recorrendo à Classificação Unificada de Solos (USC de 1985), esta destina-se a classificar os solos em geotecnia, em função da sua granulometria e plasticidade.

A carta de plasticidade relaciona o índice de plasticidade com o limite de liquidez das amostras. Esta, está dividida em várias zonas às quais corresponde um símbolo (duas letras maiúsculas) ao qual é atribuído um nome/grupo, classificando-se assim o solo.

Como mostra Figura 31, localizaram-se os vários valores obtidos pelos dois métodos utilizados na carta. A amostra P₀, pertence ao grupo MH, Silte Elástico, arenoso e as amostras P₁, P₂ e a P₃, pertencem ao grupo ML, Silte arenoso.

Para melhor classificar o solo é ainda atribuído um 3º nome em função da composição granulométrica (Anexo VIII).

Assim sendo a amostra P₀, é denominada como Silte elástico arenoso, e as amostras P₁, P₂ e P₃ como Siltes arenosos.



Legenda:

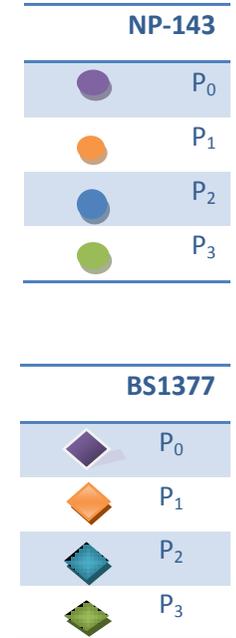


Figura 31- Localização das amostras na Carta de Plasticidade de Casagrande

4.4.1.2 Diagrama Triangular

O Diagrama Triangular (Figura 32) é um diagrama que permite, após a determinação da respectiva curva granulométrica, orientar a escolha do termo mais apropriado para designar as amostras. Está dividido em várias zonas, fazendo variar as percentagens das diferentes fracções: areia, silte e argila.

Utilizando os valores da Tabela 13, para as diferentes fracções foi possível localizar as amostras no diagrama.

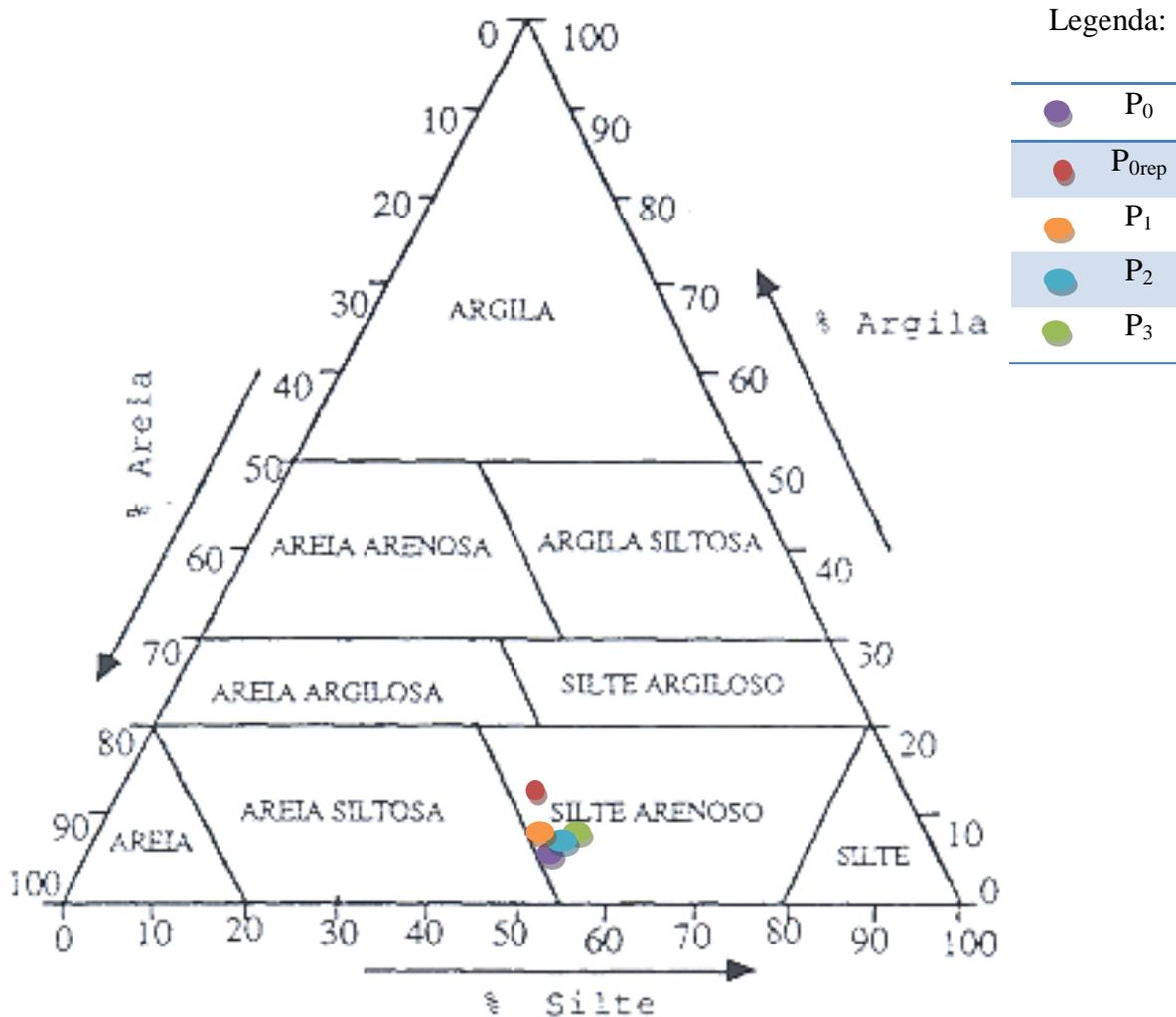


Figura 32 - Localização das amostras no diagrama triangular

Como se pode verificar pela análise da Figura 32 as amostras são classificadas como siltes arenosos. Estando assim em consonância com a classificação obtida anteriormente na carta de plasticidade.

4.5 Determinação da quantidade de azul de metileno e da actividade dos solos

A adsorção do azul de metileno pelos minerais argilosos permite medir a sua superfície hidrófila e, deste, modo, avaliar a capacidade que os minerais possuem para fixar água. Por outro lado, o facto do azul de metileno não ser absorvido pelos outros minerais, permite caracterizar a *actividade* da fracção argilosa.

Na Figura 33, apresenta-se como exemplo o processo realizado para a amostra P₃. Como se pode verificar após a adição de 140ml da solução de azul de metileno apareceu a auréola azul clara, como tal retiraram-se gotas a cada minuto (durante 5 minutos) e permanecendo a auréola. Deu-se por terminado o ensaio.

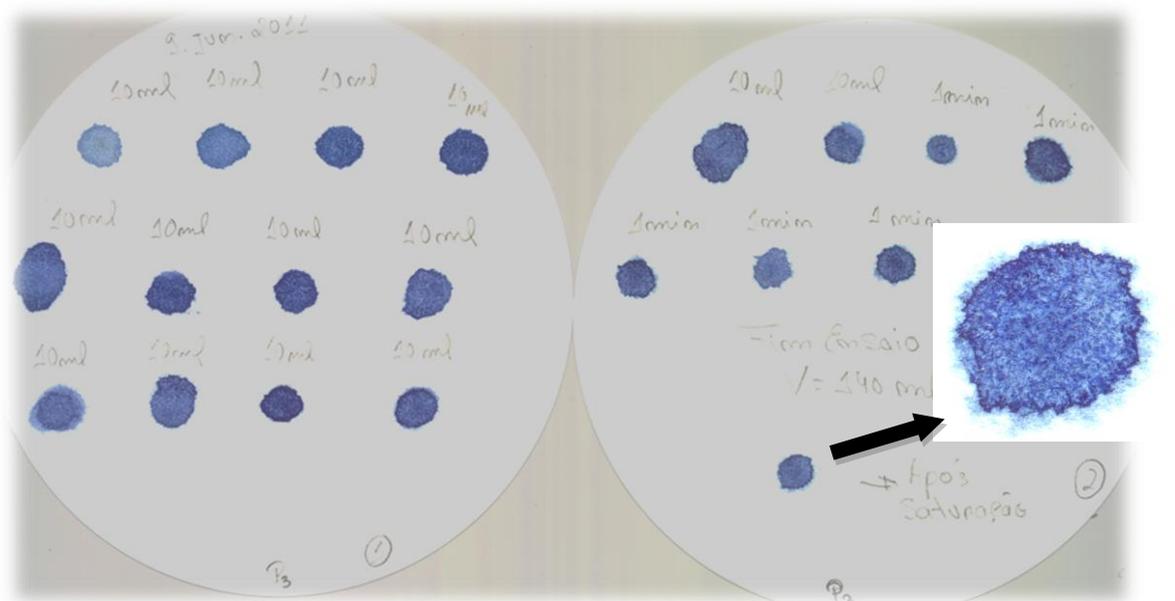


Figura 33 - Papel de filtro utilizado no ensaio do azul de metileno pelo método da mancha

Na Tabela 15, apresenta-se o volume de azul adicionado bem como, após os cálculos o valor de azul de metileno do solo (VBS), expresso em gramas de azul por 100g de solo.

Tabela 15 – Volume de azul de metileno

| | V (ml) | VBS (g/100g de solo) |
|----------------------|--------|----------------------|
| P₀ | 340,00 | 24,75 |
| P₁ | 80,00 | 8,60 |
| P₂ | 135,00 | 14,50 |
| P₃ | 140,00 | 15,09 |

No ensaio da amostra P₀ utilizaram-se 15g da fracção passada no peneiro de malha 0.074mm e como se pode verificar, o volume necessário para saturar a fracção argilosa foi muito superior ao necessário nas restantes amostras onde apenas de utilizaram 10g de solo.

Como foi referido a *actividade* é a proporcionalidade entre o índice de plasticidade de um solo e a percentagem em peso da respectiva fracção argilosa (Expressão 1). Na Tabela 16 apresentam-se: o índice de plasticidade (Tabela 9), a percentagem de fracção argilosa (Tabela 13), e a actividade obtida.

Tabela 16 – Fracção argilosa e actividade dos solos

| | IP(%) | % ≤ 0,002mm | Actividade |
|--------------------------|-------|-------------|------------|
| P₀ | | 14 | |
| i) | 22 | | 1.57 |
| ii) | 24 | | 1.71 |
| P_{0rep.} | | 8 | |
| i) | 22 | | 2.75 |
| ii) | 24 | | 3.00 |
| P₁ | | 3,8 | |
| i) | 11 | | 2,89 |
| ii) | 14 | | 3.68 |
| P₂ | | 10 | |
| i) | 11 | | 1,10 |
| ii) | 14 | | 1.40 |
| P₃ | | 3,9 | |
| i) | 12 | | 3,08 |
| ii) | 19 | | 4.87 |

Nota: i) – Valores obtidos pela NP-143 (1969) ii) – Valores obtidos pela BS-1377

Comparando os valores obtidos com os intervalos apresentados na Tabela 5 - Classificação das Argilas quanto à *actividade*, pode afirmar-se que os solos em estudo são muito activos.

4.6 Determinação da Permeabilidade

A determinação do coeficiente de permeabilidade em laboratório é conceitualmente muito simples, mas os ensaios são de difícil realização, foi assim o parâmetro que mais dificuldade ofereceu na sua determinação.

Os solos, quando não saturados apresentam coeficientes de permeabilidade menores do que quando saturados. O grau de saturação óptimo foi como tal algo difícil de obter.

Nos primeiros ensaios utilizou-se o solo seco, procedendo-se à saturação colocando permeâmetro com a amostra submerso em água, mas verificou-se que este procedimento era ineficaz pois quando se dava por terminado o ensaio a amostra permanecia quase seca na totalidade.

Optou-se então por proceder à saturação juntando à amostra uma quantidade de água de modo a criar uma pasta homogénea.

Por outro lado, outro factor importante é a compactação, factor este que influencia o índice de vazios. Utilizaram-se dois métodos para a efectuar a compactação: com pilão e com compactador leve.

Na Tabela 17 apresenta-se o estado do solo, modo de compactação e modo de saturação efectuados em cada ensaio.

Tabela 17 – Estado do solo, Compactação e Saturação das amostras

| | Estado do Solo | Modo de Compactação | Modo de Saturação |
|----------------------|-----------------|----------------------|------------------------------|
| P₀ | | | |
| Ensaio 1 | Seco | Com pilão | Permeâmetro submerso em água |
| Ensaio 2 | Pasta homogénea | Com pilão | - |
| Ensaio 3 | Pasta homogénea | Com compactador leve | - |
| P₁ | Pasta homogénea | Com compactador leve | - |

De modo a tentar facilitar a determinação do coeficiente de permeabilidade, no Ensaio 2 da amostra P₀, optou-se pela criação de um “anel” de apenas 2cm de altura. Ao qual correspondia um volume de 173.18 cm³. Preenchendo-se quer a parte inferior quer a superior com camadas de areia e gravilha fina. Verificou-se no entanto que os resultados obtidos não eram muito diferentes dos já obtidos.

Nos restantes ensaios considerou-se a altura do permeâmetro como sendo a altura da amostra, correspondendo a um volume de 978.47cm³.

Determinaram-se o peso da amostra, o teor em água, a baridade, a baridade seca, o índice de vazios e o grau de saturação, quer para as condições iniciais quer para as condições finais como apresentado na Tabela 18.

Verificou-se que o peso da amostra e o teor em água aumentou das condições iniciais para as finais. Em relação ao índice de vazios este é mais reduzido no final consequência da introdução de água e eliminação de ar. Como era de esperar o grau de saturação final é superior ao inicial.

Como os ensaios decorreram durante o Verão teve-se o cuidado de colocar um papel de filtro no tubo, de modo a evitar o mais possível a evaporação.

Na Tabela 19 apresentam-se os resultados do coeficiente de permeabilidade, *k*, obtidos no ensaio com permeâmetro de carga variável e os obtidos através das expressões de Hazen e Terzaghi.

Como se pode verificar os resultados obtidos por ambos os métodos são relativamente semelhantes.

Tabela 18 – Características iniciais e finais das amostras sujeitas ao ensaio de permeabilidade

| | P_i (gr) | w_i (%) | γ (kN/m ³) | γ_d (kN/m ³) | e_i | Sr_i (%) | P_f (gr) | W_f (%) | γ (kN/m ³) | γ_d (kN/m ³) | e_f | Sr_f (%) |
|----------------------|------------|-----------|-------------------------------|---------------------------------|-------|------------|------------|-----------|-------------------------------|---------------------------------|-------|------------|
| P₀ | | | | | | | | | | | | |
| Ensaio 1 | 1756.88 | 12 | 17.614 | 15.728 | 0.69 | 47.09 | 1991.8 | 18.17 | 19.97 | 16.90 | 0.57 | 85.91 |
| Ensaio 2 | 270.6 | 18.68 | 15.328 | 12.916 | 1.06 | 47.83 | 272.17 | 53.38 | 15.42 | 10.05 | 1.64 | 87.95 |
| Ensaio 3 | 1525.8 | 34.99 | 15.297 | 11.333 | 1.35 | 70.45 | 1731.7 | 42.30 | 17.36 | 12.20 | 1.18 | 97.23 |
| P₁ | | | | | | | | | | | | |
| Ensaio 1 | 1775.6 | 34.31 | 17.802 | 13.255 | 0.97 | 94.20 | 1790 | 36.64 | 17.95 | 13.13 | 0.99 | 98.77 |

Tabela 19 – Coeficientes de permeabilidade

| Amostra | k (cm/s) | Hazen (cm/s) | Terzaghi (cm/s) |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| P₀ | | | |
| Ensaio 1 | $2.33 \cdot 10^{-5}$ | $1.60 \cdot 10^{-5}$ | $1.53 \cdot 10^{-5}$ |
| Ensaio 2 | $2.16 \cdot 10^{-5}$ | $1.60 \cdot 10^{-5}$ | $2.02 \cdot 10^{-4}$ |
| Ensaio 3 | $2.28 \cdot 10^{-5}$ | $1.60 \cdot 10^{-5}$ | $5.80 \cdot 10^{-5}$ |
| P₁ | | | |
| Ensaio 1 | $2,71 \cdot 10^{-6}$ | $1.69 \cdot 10^{-4}$ | $9.03 \cdot 10^{-5}$ |

Comparando os valores obtidos com os a seguinte Figura 34 pode-se verificar que as amostras possuem um coeficiente de permeabilidade baixo.

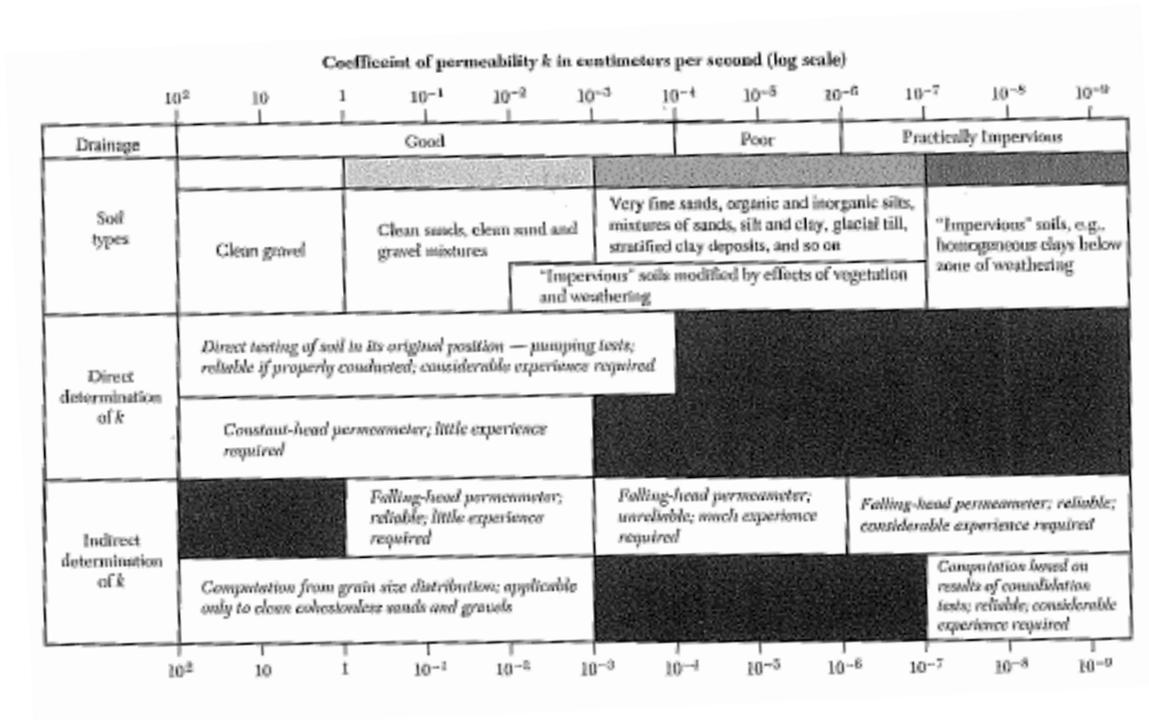


Figura 34 – Permeabilidade, características de drenagem dos solos e métodos para a sua determinação. Fonte: (Al-Khafaji & Andersland, 1992)

Como se pode verificar através da observação da Figura 34 à gama de valores obtidos 10^{-5} cm/s $< k < 10^{-6}$ cm/s correspondem areias muito finas, siltes orgânicos e inorgânicos, misturas de areia, silte e argila. Ou seja os resultados obtidos para o coeficiente de permeabilidade vão de encontro ao observado na classificação granulométrica (siltes arenosos).

É ainda de salientar que o método utilizando o permeâmetro de carga variável requer bastante experiência. As principais dificuldades/limitações encontradas no decorrer deste ensaio foram:

- Dificuldade em encontrar um teor em água e grau de compactação óptimos;
- O facto de não existir água no recipiente por baixo do permeâmetro evidencia que não houve percolação da água através da amostra, podendo por em causa a validade dos ensaios;
- O procedimento é bastante demorado, houve ensaios que demoraram aproximadamente 15 dias.

Conclusão

A caracterização das propriedades químico -geotécnicas dos solos em estudo, é fundamental para se poder avaliar o comportamento geotécnico destes materiais. Este trabalho pretendeu constituir uma contribuição para o tema.

A análise e interpretação dos resultados obtidos durante os ensaios experimentais realizados, permitem salientar aspectos importantes sobre as características das amostras estudadas.

- Através dos limites de consistência pode-se concluir que as amostras têm características plásticas
- A análise granulométrica evidenciou a existência de aproximadamente 50% de areia, entre 4 e 14% de argila e o restante de silte.
- Apesar de a zona em estudo ser atribuída, na Carta Geológica de Portugal, à formação C⁵ - Argilas de Vagos, após análise granulométrica e respectiva classificação através da carta de plasticidade e diagrama triangular, verificou-se que os solos não correspondem propriamente a argilas mas sim a siltes arenosos. A existência de varias camadas sobrepostas, sendo elas rochas sedimentares compostas por fragmentos de outras rochas, explica o facto de existirem varias classificações.
- Após a realização do ensaio do azul de metileno verificou-se que as amostras possuem muita *actividade*.
- Como foi referido, o ensaio para a determinação da permeabilidade foi aquele que ofereceu maior dificuldade na sua realização. Os resultados obtidos são coerentes para os solos em questão. No entanto dadas as limitações do ensaio podem não ser os valores reais. Em estudos futuros será interessante, para além de adoptar outro método, realizar o ensaio de permeabilidade em relação aos lixiviados.
- Para avaliar a aplicação dos materiais em sistemas de impermeabilização de aterros sanitários seriam necessários mais alguns ensaios para além dos realizados, nomeadamente: ensaios de compactação, capacidade de troca catiónica e determinação da mineralogia.
- Por outro lado a construção de um aterro sanitário na zona em questão requereria um estudo mais aprofundado do local, bem como ponderar todas as condicionantes ambientais e económicas.

Bibliografia

- Al-Khafaji, & Andersland. (1992). *Geotechnical Engineering & Soil Testing*. International Edition.
- Antão, A. M. (2007). *Sebenta de Poluição dos Solos*. Instituto Politecnico da Guarda.
- Barbosa, B. P. (1981). *Carta Geologica de Portugal - Noticia Explicativa da Folha 16 C Vagos*. Lisboa.
- Barroso, M., Ferreira, M., & Lemos, L. *Considerações geológico - geotécnicas acerca dos aterros sanitários*. Artigo Científico.
- Benta, A. (2007). Aspectos do Comportamento Geomecânico da Formação "Argilas de Aveiro". *Tese de Doutoramento* . Universidade de Aveiro.
- BS 1377: Part 2. (1990). *Soils for civil engeneering purposes* . Bristish Standards Institution .
- Castelo Branco, F. V. (1996). Estudo da influência de uma contaminação no comportamento mecânico de um agregado calcário de granulometria extensa. *Tese de Mestrado* . Universidade de Coimbra.
- E 195. (Junho de 1967). *Solos - Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação* . Especificação do LNEC.
- E 196. (Junho de 1967). *Solos - Análise Granulométrica* . Especificação do LNEC.
- E 218. (Julho de 1968). *Prospecção Geotécnica - Colheita de Amostras* . Especificação do LNEC.
- E 219. (1968). *Prospecção Geotécnica de Terrenos. Vocabulário*. Especificação do LNEC.
- Fernandes, M. d. (1994). *Mecânica dos solos*. FEUP.
- Galhano, C., Gomes, C., & Rocha, F. *Relação entre as propriedades geotécnicas e a composição e textura de argilas e lodos da zona urbana de Aveiro*. Artigo Científico.
- Jeremias, F. (1991). *Importância da expansibilidade na durabilidade dos materiais rochosos e técnicas laboratórias para sua avaliação*. Tese de Mestrado - Universidade Nova de Lisboa.
- Jesus, C., & Costa, C. (1997). Estudos de instalação e reabilitação de Aterros de Resíduos em Meios de Elevado Risco Geológico - Ambiental. Lisboa: 6º Congresso Nacional de Geotecnia .
- LaGrega, M. D., Buckingham, P. L., & Evans, J. C. (2001). *Hazarous Wast Management*. Mc Graw Hill International Edition.
- Lopes, M. (1997). *Utilização de geossintéticos em aterros de RSU: controlo de qualidade*. 6º Congresso Nacional de Geotecnia: Artigo Científico.
- Martinho, M., & Gonçalves, M. (2000). *Gestão de Resíduos*. Universidade Aberta.
- NP - 83. (1965). *Solos - Determinação da densidade das partículas* . Norma Portuguesa.

NP -84. (1965). *Determinação do teor em água* . Norma Portuguesa.

NP-143. (1969). *Determinação dos Limites de Consistência* . Norma Portuguesa.

Rodrigues, C. (1994). Cartografia Geotécnica no Planeamento do Concelho de Oliveira do Bairro. *Tese de Mestrado* . Universidade de Coimbra.

Rodrigues, C., Aguilar, C., & Mortágua, M. *Caracterização Geotécnica das "Argilas de Vagos"*. Artigo Científico.

Santos, M. H. (1998). Potencialidades de Argilas Portuguesas para o uso como materiais de selagem em sistemas geoambientais de confinamento de resíduos. *Tese de Mestrado* . Aveiro: Universidade de Aveiro.

ANEXOS

Anexo I

Localização do barreiro “Barroquinha” na Carta
Militar nº196

Escala 1:25 000

Anexo II

Localização do barreiro na Carta Geológica de
Portugal – Folha 16-C Vagos

Escala 1:50 000

Legenda:

Anexo III

Registo de amostragem



ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA E
GESTÃO
INSTITUTO POLITÉCNICO DA GUARDA
Engenharia do Ambiente

Registo de Amostragem

Data: 11-04-2011

Hora: 17h

Local: Barreiro
"Barroquinha"

| Amostras | P0 | P1 | P2 | P3 |
|---------------------------|--|---------------------------------------|--|--|
| | Vermelha | Cinzenta | Castanha | Vermelha- acastanhada |
| Coordenadas | 40°30'55,8"N 8°37'16,7" W | 40°30'53,6"N 8°37'21,2" W | 40°30'52,14"N 8°37'10,11" W | 40°30'49,22"N 8°37'12,30" W |
| Profundidade | 3m abaixo do terreno | Debaixo da camada fina de calcário | ≈ 20m acima do lago | Bancada acima do P2, abaixo da P0 e P1 |
| Aspecto Visual | Argila Plástica | Argila Cinzenta Pouco Plástica | Argila de plasticidade intermédia | Argila de plasticidade intermédia |
| Observações | 3-5m de espessura Argila vermelha com peq. Inter. De cinza-esverdeada | | Geme água local onde a máquina estava parada | Frente ponte |
| Quantidade de Amostras | Amostras- 2 Amostrador- 1 Teor água- 1 | Amostras- 2 Teor água- 1 | Amostras- 2 Teor água- 1 | Amostras- 2 Amostrador- 1 Teor água- 1 |

Anexo IV

Fotografias dos locais de amostragem



Foto 1- Localização da amostra P_0



Foto 2- Localização da amostra P_1



Foto 3 - Localização da amostra P₂



Foto 4 - Localização da amostra P₃

Anexo V

Calibração do densímetro

Foi necessário proceder à calibração do densímetro e da proveta.

Para tal procedeu-se do seguinte modo:

Determinou-se a área média A da proveta de 1000cm^3 , em que o densímetro foi utilizado, medindo a distância entre dois traços de referência, e dividiu-se o volume correspondente pela distância em centímetros entre os traços.

Mediu-se e registaram-se as distâncias h_s entre a marca de graduação inferior da escala L e cada uma das principais graduações LS da escala do densímetro.

Mediu-se a distância d entre o início do bolbo e a marca de graduação inferior da haste do densímetro.

Calculou-se a distância HS correspondente a uma leitura LS , somando as distâncias h_s e d .

Mediu-se a altura do bolbo h .

Calculou-se a profundidade correspondente a cada uma das principais de calibração, pela fórmula:

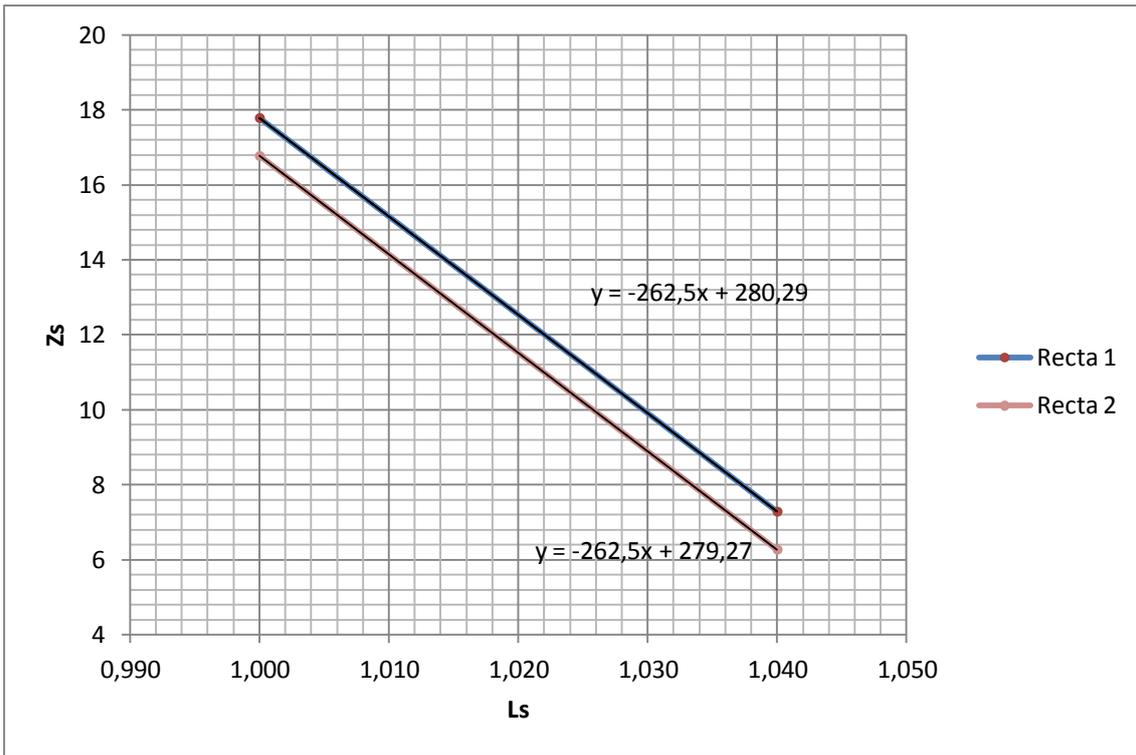
$$Z'S = HS + \frac{1}{2} * h$$

Calculou-se ainda profundidade efectiva correspondente a cada uma das marcas principais de calibração, pela fórmula:

$$ZS = HS + \frac{1}{2} (h - V/A)$$

Para determinar o ZS , profundidade efectiva, procedeu-se da seguinte forma: nas 3 primeiras leituras utilizou-se a equação da recta 1, substituindo o valor de x , pela leitura do densímetro (LS), nas restantes leituras utilizou-se a recta 2, procedendo-se do mesmo modo.

Para o densímetro em calibração e no mesmo diagrama traçaram-se as rectas referidas anteriormente, como se apresenta no seguinte gráfico:



Anexo VI

Folha de cálculo peneiração

**INSTITUTO POLITÉCNICO DA GUARDA
LABORATÓRIO DE GEOTECNIA**

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA: E - 196 (1967)

Projecto: Ambiental

Amostra: P0

FRACÇÃO PASSADA NO PENEIRO DE 2,00 mm (Nº10)

Massa da amostra a ensaiar (g), m_a = 50,02

Teor de humidade da amostra a ensaiar (%), W_a = 13,38

Massa de solo após pré-tratamento (g), m_b = 41,85

Percentagem de material retido no nº 10 ; $N'10$ = 0,00

$N''10 = (m'10/mt) \times 100 = 100,00$

| Peneiros | peso do peneiro mais amostra seca (g) | Peso do Peneiro (g) | Massa retida (g) (mx) | % retida no peneiro $n'x = (mx/mb) \times 100$ | % retida acumulada | % acumulada | % acum. |
|---------------|---------------------------------------|---------------------|--------------------------|---|--------------------|-------------------|--------------------------------------|
| | | | | | | passada $n''x$ | passada (total) |
| | | | | | | | $N''x = n''x * ((100 - N'10) / 100)$ |
| 0.850 (nº20) | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 100,00 |
| 0.425 (nº40) | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 100,00 |
| 0.250 (nº60) | 363,90 | 360,23 | 3,67 | 8,77 | 8,77 | 91,23 | 91,23 |
| 0.106 (nº140) | 349,40 | 335,61 | 13,79 | 32,95 | 41,72 | 58,28 | 58,28 |
| 0.074 (nº200) | 339,60 | 335,27 | 4,33 | 10,35 | 52,07 | 47,93 | 47,93 |
| cego | 373,48 | 371,53 | 1,95 | 4,66 | | | |

Anexo VII

Folha de cálculo Sedimentação

Amostra: P₃

PROCESSO DE SEDIMENTAÇÃO

Proveta n° 4
Densímetro n° 246572

| Data | Tempo (min.) | Temp. (°C) | Temp. (°C) | CT | CA | Leituras (Ls) | Lc | Zs (cm) | nD (%) | ND (%) | K Tabela | D (mm) |
|------------|--------------|------------|------------|--------|--------|---------------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|
| 13-06-2011 | 1 | 22 | 22 | 0,0004 | 0,0024 | 1,0085 | 1,00750 | 15,56 | 24,5976 | 24,5976 | 0,013320 | 0,05254 |
| 13-06-2011 | 2 | 22 | 22 | 0,0004 | 0,0024 | 1,0072 | 1,00620 | 15,90 | 20,3340 | 20,3340 | 0,013320 | 0,037557 |
| 13-06-2011 | 5 | 22 | 22 | 0,0004 | 0,0024 | 1,0055 | 1,00450 | 16,35 | 14,7586 | 14,7586 | 0,013320 | 0,024084 |
| 13-06-2011 | 15 | 22 | 22 | 0,0004 | 0,0024 | 1,0046 | 1,00360 | 15,56 | 11,8069 | 11,8069 | 0,013320 | 0,013567 |
| 13-06-2011 | 30 | 22 | 22 | 0,0004 | 0,0024 | 1,004 | 1,00300 | 15,72 | 9,8391 | 9,8391 | 0,013320 | 0,009642 |
| 13-06-2011 | 60 | 22 | 22 | 0,0004 | 0,0024 | 1,0032 | 1,00220 | 15,93 | 7,2153 | 7,2153 | 0,013320 | 0,006863 |
| 13-06-2011 | 250 | 22 | 22 | 0,0004 | 0,0024 | 1,0021 | 1,00110 | 16,22 | 3,6077 | 3,6077 | 0,013320 | 0,003393 |
| 14-06-2011 | 1440 | 22 | 22 | 0,0004 | 0,0024 | 1,002 | 1,00100 | 16,25 | 3,2797 | 3,2797 | 0,013320 | 0,001415 |
| 15-06-2011 | 2880 | 22 | 22 | 0,0004 | 0,0024 | 1,0019 | 1,00090 | 16,27 | 2,9517 | 2,9517 | 0,013320 | 0,001001 |

| | |
|----|-------|
| LA | 1,002 |
| CM | 0,001 |
| G | 2,68 |

| | |
|----|-------|
| mb | 48,64 |
|----|-------|

massa antifloculante

6,6 g

100cm³ água destilada

Anexo VIII

Classificação dos solos

Anexo IX

NF 94- 068 – Sols: reconnaissance et essais – Mesure de la
quantité et de l'activité de la fraction argileuse

Anexo X

Determinação do valor de azul de metileno (Norma traduzida)

1. Domínio de Aplicação

Esta norma destina-se a precisar o domínio de alcance do valor de azul-de-metileno de um solo e seus modos de determinação, através do ensaio denominado teste da mancha do azul-de-metileno.

O valor de azul-de-metileno de um solo (VBS) constitui um parâmetro de identificação que mede globalmente a quantidade e actividade da fracção argilosa contida num solo ou material rochoso.

2. Referencias Normativas

3. Definições e Símbolos

VBS- valor de azul de metileno de um solo. Exprime - se em gramas de azul por 100g de fracção 0/50 mm de solo estudado.

D_{max} - valor significativo da dimensão dos grãos maiores presentes no solo estudado. Considera-se que este valor corresponde ao D_{95} do solo.

4. Princípios

O ensaio consiste em medir por dosagem a quantidade de azul-de-metileno que pode ser absorvido pela amostra ensaiada.

Este valor é reportado por proporcionalidade directa à fracção 0/50mm do solo. O valor de azul do solo está directamente ligado à superfície específica das partículas que constituem o solo, a qual é regida pela importância e actividade dos minerais argilosos presentes na fracção fina do solo.

A dosagem efectua-se juntando sucessivamente diferentes quantidades de azul-de-metileno, e controlando a adsorção após cada adição.

Para fazer isso, é preciso uma gota de suspensão, que é depositada num filtro de papel, o que provoca a criação de uma mancha.

A adsorção máxima é atingida quando uma auréola azul clara persistente se produz na periferia dessa mancha.

5. Aparelhos e material

a) Aparelhos específicos

- Um dispositivo de dosagem que permita injectar quantidades de $2,5 \text{ cm}^3$ e 10 cm^3 volumes de solução de azul e de conhecer a quantidade total injectada a 1 cm^3 ;
- Um agitador mecânico (400 e 700rot/min);
- Um recipiente cilíndrico, com capacidade 3000 cm^3 e de diâmetro de 155mm;
- Uma vareta de vidro;
- Papel de filtro branco com teor em cinzas $< 0.01 \%$; massa específica 95 g/m^2 , espessura 0.2mm, velocidade de filtração 75s, diâmetro de retenção 8mm;
- Peneiros de malhas 5mm e 50 mm.

b) Aparelhos correntes

- Balança;
- Termómetro graduado em graus (de 0°C a 100°C);
- Cronómetro indicando os segundos;
- Aparelho de secagem (estufa) para determinar o teor de água dos solos através de um método normalizado;
- Sacos de plástico e recipientes herméticos.

c) Produtos

- Solução de Azul-de-metileno de qualidade medicinal, $10 \text{ g/L} \pm 0.1 \text{ g}$, produzida com menos de 30 dias e conservada num recipiente fechado e ao abrigo da luz;
- Água desmineralizada ou destilada.

6. Preparação da amostra

Se o D_{\max} do material é $\leq 50\text{mm}$ tomar uma massa m do material com um teor de água natural tal que: $m > 200D_{\max}$ (m em gramas, D_{\max} em milímetros).

Se o D_{\max} do material é $>50\text{mm}$, tomar 10Kg da fracção 0/50mm.

Se o D_{\max} da amostra é $\geq 5\text{mm}$:

- Separar por peneiração e se necessário por lavagem a fracção 0/5mm contida na amostra.
- Determinar a proporção ponderada C da fracção 0/5mm (seca) contida no material (ou na fracção 0/50mm quando $D_{\max} > 50\text{mm}$). Esta proporção pode ser lida na curva granulométrica do material, se esta for conhecida, ou então determinada através de outra amostra representativa do material.

Dividir e homogeneizar a fracção 0/5mm assim preparada (ou a totalidade da amostra se $D_{\max} < 5\text{mm}$) de modo a preparar três tomas de ensaio com massas sensivelmente iguais (com $\pm 5\text{g}$) da ordem de:

- 30g a 60g no caso de solos muito argilosos a argilosos;
- 60g a 120g no caso de solos médios a pouco argilosos;

A primeira toma de ensaio de massa m_1 , é introduzida no recipiente de 3000cm^3 , colocada em suspensão com $500\text{cm}^3 \pm 10\text{cm}^3$ de água desmineralizada e dispersar com a ajuda de um agitador (velocidade 700rot/min) no mínimo durante 5min e em todos os casos até à dispersão visual de todo o aglomerado de partículas de argila em suspensão.

A segunda toma de ensaio de massa m_2 é utilizada para determinar o teor de água de cada uma das tomas de ensaio.

A terceira toma de ensaio é conservada num saco ou recipiente hermético na eventual necessidade do ensaio ter de ser repetido (má estimação dos incrementos da solução de azul adicionado após este teste).

7. Procedimento

Colocar a toma de ensaio em “embebição”, como descrito anteriormente e proceder à dosagem do azul-de-metileno como indicado a seguir.

Com a ajuda do dispositivo de dosagem introduzir na suspensão, mantendo em permanente agitação a 400rot/min, 5 a 10cm³ de azul de acordo com a argilosidade estimada do material (10cm³ para os materiais mais argilosos); depois de 1min ±10s, proceder ao ensaio “da mancha” no papel de filtro da seguinte maneira:

- Retirar com a ajuda da vareta de vidro uma gota da suspensão e deposita-la sobre o papel de filtro. A mancha assim formada é composta por um depósito central de material colorido azul-escuro rodeada por uma zona húmida incolor.

- A gota retirada deve formar um depósito central compreendido entre 8mm e 12mm de diâmetro.

Proceder a injecções sucessivas passo a passo de 5cm³ a 10cm³ (de acordo com argilosidade do material) da solução de azul até que apareça uma auréola azul clara na zona húmida periférica da mancha. O ensaio é assim positivo. A partir deste momento, deixar que a absorção do azul continue, e efectuar os ensaios, de minuto em minuto, sem adição de solução.

Se a aureola azul clara desaparecer após o quinto minuto, proceder a novas injecções de azul com intervalos de 2cm³ e 5 cm³, consoante a argilosidade do material, em vez dos 5cm³ a 10cm³ introduzidos anteriormente, porque nesta fase a suspensão esta perto da saturação.

Cada adição é seguida de ensaios efectuados de minuto em minuto. Estas operações são repetidas até que o teste se torne positivo para cinco minutos consecutivos. A dosagem está terminada e determina-se o volume total (V) da solução de azul necessário para atingir a adsorção total.

O recipiente e os acessórios em contacto com a solução de solo e azul são lavados e bem enxugados com água limpa se foram utilizados produtos de limpeza.

8. Cálculos e expressões dos resultados

As grandezas medidas no decurso do ensaio são:

- m_1 – massa húmida da amostra no primeiro provete (gramas)
- m_2 – massa húmida da amostra seca na estufa (gramas)
- m_3 – massa seca da amostra seca na estufa (gramas)
- V – volume da solução de azul utilizado (cm^3)

Os cálculos a executar são:

- Conteúdo de água da amostra submetida a ensaio (0/5mm):

$$W = \frac{m_2 - m_3}{m_3}$$

- Massa seca do provete:

$$m_0 = \frac{m_1}{1 + w}$$

- Massa de azul introduzido (gramas):

$$B = V * 0.01$$

- A expressão do resultado é (em gramas de azul por 100 de solo seco):

$$\text{VBS} = \frac{B}{m_0} * 100$$

Para materiais em que $D_{\text{max}} > 5\text{mm}$, a expressão do resultado é:

$$\text{VBS} = \frac{B}{m_0} * C * 100$$

Com C sendo a proporção entre a fracção 0/5mm e a fracção 0/50 do solo seco.

9. Registo de ensaio

O registo de ensaio deve conter as seguintes informações:

- Referencia à norma;
- Proveniência das amostras;
- Data e modo de recolha.

- Data de ensaio;
- Proporção da fracção 0/5mm;

Anexo A

Modo de Preparação da solução do azul-de-metileno

Para a preparação da solução 10g/L, deve-se proceder do seguinte modo:

- Utilizar o azul de Metileno, com a formula $C_{16}H_{18}N_3S \cdot nH_2O$ (n+2 a 3), com grau de pureza $\geq 98,5\%$, comercializado com o nome de "Azul de Metileno puro para análises medicinais". Apresenta-se sobre a forma de pó acondicionado em frascos.

- Determinar o teor de água "w" do azul-de-metileno, tomando algumas gramas de pó que foram secas a $90^\circ C$ no máximo, até massa constante, é o mesmo que dizer que em 2 pesagens sucessivas, separadas de 15 minutos, a diferença não deve ser mais que 0.5%. Em seguida para uma toma diferente, pesar uma massa de azul-de-metileno húmido, fazendo uma correcção apropriada do teor de água (W exprime-se em %) aplicando-se a seguinte formula:

$$\text{Massa húmida} = ((100+w))/100*10 \quad (\text{gramas})$$

O conteúdo de água deve ser determinado a cada preparação de uma nova solução.

Aquecer $900g \pm 10g$ de água desmineralizada ou destilada a uma temperatura máxima de $60^\circ C$.

Agitar, introduzir lentamente a massa de azul-de-metileno, pesado anteriormente, na água, continuar a agitação até que se complete a dissolução.

Deixar arrefecer até os $20^\circ C$.

Completar a solução com água destilada ou desmineralizada até obter $1010 \pm 1g$.

O recipiente de armazenamento da solução deve ser em vidro escuro, e mantido ao abrigo da luz.

A duração deste preparado não deve exceder um mês.