



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Caracterização de diferentes solos e análise prospetiva com vista à respectiva estabilização

Bruno Filipe Pinto Bessa dos Santos Dias



2016

(página propositadamente em branco)



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Caracterização de diferentes solos e análise prospetiva com vista à respectiva estabilização

Bruno Filipe Pinto Bessa dos Santos Dias

1110428

*Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizada sob a orientação do Doutor José Fernandes, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

(página propositadamente em branco)

Júri

Presidente

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé
Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor José Augusto de Abreu Peixoto Fernandes
Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutora Sílvia Vieira Pinto Alves da Costa Spínola
Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutora Telma Godinho Barroso
Directora I&D, GEO ground engineering operations, Lisboa

*A tese de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG)** foi apresentada e defendida em prova pública, pelo Licenciado **Bruno Filipe Pinto Bessa dos Santos Dias**, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em 10 de Novembro de 2016 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **16 (dezasseis) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

(página propositadamente em branco)

Agradecimentos

Durante todo o processo de realização da presente dissertação tive a oportunidade usufruir do apoio direto e indireto de várias pessoas e instituições sem as quais tudo isto não seria possível. Não é viável referir todos os nomes daqueles que de uma forma ou de outra acabaram por influenciar o produto final. No entanto há contributos aos quais não posso deixar de mostrar o meu apreço e agradecimento sincero.

Ao Professor José Fernandes, pela sua orientação, por me ter proposto este desafio e proporcionado a oportunidade de trabalhar este tema, que inicialmente não estava no âmbito daquilo que planeava explorar como dissertação, mas que acredito ter-se tornado numa mais-valia para as minhas competências académicas e profissionais que de outra forma dificilmente existiria. Proporcionou-me liberdade na medida exata para explorar o tema, e sempre que era necessário algum conselho ou ajuste permanentemente e pacientemente manteve a porta aberta, sempre pronto a apoiar.

À Doutora Telma Barroso, pela sua colaboração na orientação, por ter criado a possibilidade da colaboração entre as duas instituições que são o *ISEP* e a *GEO – Ground Engineering Operations*, colaboração essa que eu tive o privilégio de usufruir, trabalhando um tema que é relativamente inexplorado. Ao longo de todo este processo foi inestimável o seu apoio, encorajamento e disponibilidade, mesmo que à distância. Os seus conselhos foram muito importantes em ultrapassar algumas alturas em que as coisas pareciam não ter solução. Várias vezes a sua preocupação com o estado do documento e com a calendarização revelaram-se essenciais para o seu avanço e conclusão.

À *GEO – Ground Engineering Operations* por ter permitido que pudesse explorar um assunto pouco estudado e abriu as suas portas para que pudesse realizar o ensaio de potencial elétrico Zeta, um dos ensaios que revelou ser uma mais-valia e perceber melhor o contexto do material de estudo.

Ao *LGMC – Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP*, por ter posto à minha disposição todas as suas instalações e equipamentos para que pudesse realizar a maior parte dos ensaios laboratoriais. Estendo também um agradecimento particular à Doutora Sílvia Spínola e ao Sr. Carlos Ferreira pelo apoio na realização destes.

Ao *Centro de Estudo de Águas do ISEP*, particularmente à Doutora Rosária Santos, por ter disponibilizado os seus equipamentos para a realização do ensaio de condutividade elétrica.

Ao *ISEP*, particularmente ao *Departamento de Engenharia Geotécnica* e a todo ao seu corpo docente por ter proporcionado todas as oportunidades académicas que poderia usufruir, preparando-me de uma maneira sem igual para a minha vida profissional.

A todos aqueles que me acompanharam neste percurso académico no *Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP*, em particular àqueles que estiveram comigo até este último ano: o Renato, o Carlos, a Diana, o Eduardo, o João, o Luís, a Mariana, a Raquel, o Rui e a Sílvia. Se não fosse o vosso apoio e ajuda na preparação de tantos trabalhos, exames e jantares tenho a certeza que não teria sido exatamente a mesma coisa.

A todos os meus amigos e aqueles que me são achegados, que ao longo dos anos me ajudaram a ser aquele que hoje eu sou. Agradeço em particular as palavras de apoio e encorajamento daqueles que me ajudaram nas alturas em que estava mais desanimado e sobrecarregado.

À minha irmã Filipa em particular por ter revisto todo o texto desta tese, apesar de não ter qualquer tipo de bases na área, o texto base não ser de todo muitas vezes o mais cuidado e tê-lo feito em tempo recorde. Isto tudo com as limitações que advêm de uma gravidez. Foi deveras um esforço notável.

À minha família, em particular aos pais. Mais do que ninguém eles definiram aquilo que hoje sou. Proporcionaram-me todas as condições e circunstâncias que alguém alguma vez poderia desejar. Tudo isto transmitindo sempre apoio e amor de uma maneira incondicional e abnegada. Acredito que nunca haverá nada que possa fazer para verdadeiramente reconhecer o esforço, agradecer e retribuir.

Obrigado.

(página propositadamente em branco)

Palavras-chave

Solos, ensaios geotécnicos laboratoriais, estabilidade de furo, granulometria dos solos, propriedades dos solos

Resumo

O objetivo deste trabalho consistiu em analisar essencialmente as propriedades físicas e químicas de diferentes tipos de solos de modo a poder categorizá-los com particular ênfase no seu comportamento aplicado à escavação de fundações profundas com estabilização de solos recorrendo a fluídos poliméricos.

Atendendo à estrutura polifásica dos solos e, também, à natureza e quantidade de material fino presente, que em muitas circunstâncias explicam a menor capacidade de carga para as solicitações impostas durante a construção ou na vida útil das estruturas, pareceu pertinente caracterizar e avaliar as propriedades dos solos que eventualmente poderão ter uma influência no respetivo comportamento, face às exigências de trabalhabilidade e estabilidade dos mesmos. Assim, e sob o ponto de vista geotécnico, tentou-se ainda abordar os principais fatores que controlam a estabilidade de misturas de solo e agregado, nomeadamente a distribuição dos calibres das partículas dos solos, a proporção de partículas finas e a plasticidade dos materiais finos.

Numa primeira fase foi realizada uma pesquisa bibliográfica incidente nos ensaios laboratoriais realizados, as inter relações conhecidas entre os seus diversos parâmetros e as características básicas dos elementos utilizados na estabilização dos solos. De seguida, foram realizados ensaios laboratoriais a diferentes amostras de solo com várias origens de modo a verificar as características físicas e químicas de cada um. Por fim, foram estabelecidas relações entre as diferentes características analisadas de cada uma das amostras de solo e, tendo como base essa comparação, foram definidos os parâmetros que têm mais impacto na estabilidade dos solos com o objetivo da construção de uma fundação profunda.

(página propositadamente em branco)

Keywords

Soils, geotechnical laboratory tests, excavation hole stability, soil particle size, soil properties

Abstract

The objective of this work was essentially to analyse the physical and chemical proprieties of different soils with a view to their categorization, with a particular emphasis in their behaviour applied to the digging off deep foundations with soil stabilization using fluidic polymers.

Relatively to the soil polyfasic structure, as well as their nature and amount of fine material present, that in many circumstances accounts for a lower strength in relation to the loading applied during the structures building and lifespan, it seemed relevant to characterize and evaluate the soil proprieties that may have an influence regarding to its behaviour faced with their workability and stability demands. That way, under a geotechnical perspective, it was attempted to approach the main factors that control soil and aggregate mixtures stability, namely the different soil particles calibres distribution, their fine particles ratio and their plasticity.

In a first stage a bibliographical study was made, focussing on the laboratorial tests made, the relationship between its various parameters and the basic characteristics of the materials used in soil stabilization. Then, laboratorial tests were made to different soil samples with various origins with the goal to ascertain their physical and chemical characteristics. Lastly, relations between the different studied proprieties of each soil were made, with a special focus on the parameters that have a bigger impact in soil stabilization with the purpose of the installation of deep foundations.

(página propositadamente em branco)

ÍNDICE

1. Introdução.....	2
1.1. Enquadramento.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estrutura.....	4
2. Estado da arte.....	6
2.1. Estabilização de solo.....	7
2.2. Análise granulométrica.....	15
2.3. Limites de Consistência	21
2.4. Teor de água	23
2.5. Equivalente de areia	23
2.6. Azul de metileno.....	24
2.7. Composição química.....	25
2.8. Salinidade	26
2.9. Permeabilidade.....	28
2.10. Composição mineralógica	30
2.11. Potencial elétrico Zeta.....	32
3. Material de estudo.....	35
4. Protocolos.....	39
4.1. Teor de água	39
4.2. Análise granulométrica por peneiração húmida	40
4.3. Ensaio de sedimentação.....	42
4.4. Ensaio de consistência	44
4.5. Equivalente de areia	47
4.6. Massa específica.....	51
4.7. Azul de metileno.....	53
4.8. Análise Química Quantitativa por Espectrometria de Fluorescência de Raios X Equipamento Portátil.....	56
4.9. Condutividade elétrica	58
4.10. Potencial elétrico Zeta.....	59

5.	Apresentação e discussão de resultados.....	62
5.1.	Apresentação de resultados.....	62
5.1.1.	Teor de água.....	62
5.1.2.	Análise granulométrica.....	62
5.1.3.	Limites de consistência.....	66
5.1.4.	Equivalente de Areia.....	69
5.1.5.	Massa específica.....	70
5.1.6.	Azul-de-metileno.....	70
5.1.7.	Salinidade.....	71
5.1.8.	Permeabilidade.....	71
5.1.9.	Forças atrativas e repulsivas.....	72
5.1.10.	Composição química.....	73
5.1.11.	Composição mineralógica estimada.....	76
5.2.	Discussão dos resultados.....	79
6.	Conclusões.....	82
	Bibliografia.....	84
	Anexo I – Cálculos para ensaio granulométrico por peneiração húmida.....	88
	Anexo II – Cálculos para ensaio de sedimentação.....	89
	Anexo III– Cálculos da curva granulométrica a partir dos ensaios de peneiração húmida e sedimentação agregados.....	92
	Anexo IV – Cálculos para ensaio análise química quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios X.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Variação da área específica de uma partícula de volume constante (Eastern Illinois University, 2016).	7
Figura 2 – Solo com diferentes quantidades de água e ar (adaptado de http://mavdisk.mnsu.edu/larsop2/geog101/WeatheringandSoils/Soils/SoilWaterDiag.jpg).	7
Figura 3 – Fases do processo construtivo de uma estaca moldada por solução de polímero (1 e 2 - Furação com trado suspenso recorrendo com recurso a polímero de estabilização; 3 - Utilização de balde para remoção do solo; 4 - Inserção da armadura; 5 - Betonagem; 6 - Estaca finalizada) (http://www.terratest.es).	9
Figura 4 – Diferentes tipos de estrutura granular dos solos (University of Hawai at Mānoa, 2016).	15
Figura 5 – Dupla camada elétrica numa partícula de argila (Fernandes, 2011).	17
Figura 6 – Diagrama de Feret para a designação de solos (Fernandes, 2011).	18
Figura 7 – Determinação dos valores de D_{10} , D_{30} e D_{60} de um solo (Fernandes, 2011).	19
Figura 8 – Relação entre a área aberta e a abertura para peneiros quadrados (adaptado de Loveland & Whalley, 2001).	20
Figura 9 – Ensaio de equivalente de areia para solos com diferentes teores de finos (adaptado de http://www.fastonline.org/cd3wd_40/cd3wd/construc/h2449e/en/b713_5.htm).	24
Figura 10 – Princípio de funcionamento do equipamento de análise química quantitativa de fluorescência de raios X. (adaptado de Queirós, 2011).	26
Figura 11 – Lixiviação dos sais do solo através de bombagem de água (State Water Resources Control Board Division of California, 2016).	27
Figura 12 – Camada elétrica dupla em torno da partícula (adaptado de nanoComposix, 2012).	33
Figura 13 - Solo PT_x	35
Figura 14 - Solo PT_G	35
Figura 15 - Solo IN_1	35
Figura 16 - Solo IN_2	36
Figura 17 - Solo ML_K	36
Figura 18 – Solo PT_x petrificado.	37
Figura 19 – Principais aparelhos e utensílios utilizados para o ensaio do teor de água.	39
Figura 20 – Principais aparelhos e utensílios utilizados para o ensaio de análise granulométrica por peneiração húmida.	40
Figura 21 – Principais aparelhos e utensílios utilizados para o ensaio de sedimentação.	42
Figura 22 – Montagem do ensaio de sedimentação e pormenor da leitura do densímetro.	44
Figura 23 – Principais aparelhos e utensílios utilizados para os ensaios de consistência.	45
Figura 24 – Montagem do ensaio de limite de plasticidade antes e após as pancadas da concha de Casagrande.	46
Figura 25 – Filamento cilíndrico utilizado para a determinação do limite de plasticidade.	47

Figura 26 – Principais aparelhos e utensílios utilizados para o ensaio de equivalente de areia.....	48
Figura 27 – Montagem do ensaio de equivalente de areia.....	51
Figura 28 – Principais aparelhos e utensílios utilizados para o ensaio de massa específica.....	52
Figura 29 – Montagem do ensaio de massa específica.....	53
Figura 30 – Principais aparelhos e utensílios utilizados para o ensaio de azul de metileno.....	54
Figura 31 – Auréola azul permanente no ensaio de Azul de metileno.	55
Figura 32 – Tabela periódica com os elementos químicos detetáveis pelo equipamento de fluorescência de Raios-X, NITON XL3 (900), assinalados a vermelho. (adaptado de http://www.slideshare.net/EstudeMais/quimica-Tabela-periodica-dos-elementos,2014).	56
Figura 33 – Principais aparelhos e utensílios utilizados para o ensaio de análise química por fluorescência de raio X.	57
Figura 34 – Aparelhos e utensílios utilizados para o ensaio de condutividade elétrica.....	58
Figura 35 – Principais aparelhos e utensílios utilizados para o ensaio de potencial elétrico Zeta (http://i01.yizimg.com/ComFolder/32595/200608/200686144510687).	59
Figura 36 – Identificação da posição dos sedimentos pelo operador em <i>software</i> dedicado.....	60
Figura 37 – Curvas granulométricas determinadas nos ensaios de peneiração húmida e sedimentação para o solo PT _x	63
Figura 38 – Curvas granulométricas determinadas nos ensaios de peneiração húmida e sedimentação para o solo PT _G	63
Figura 39 – Curvas granulométricas determinadas nos ensaios de peneiração húmida e sedimentação para o solo IN ₁	64
Figura 40 – Curvas granulométricas determinadas nos ensaios de peneiração húmida e sedimentação para o solo IN ₂	64
Figura 41 – Curvas granulométricas determinadas nos ensaios de peneiração húmida e sedimentação para o solo ML _k	65
Figura 42 – Número de pancadas em função do teor de água no ensaio de limite de liquidez para o solo PT _x	66
Figura 43 – Número de pancadas em função do teor de água no ensaio de limite de liquidez para o solo IN ₂	67
Figura 44 – Número de pancadas em função do teor de água no ensaio de limite de liquidez para o solo ML _k	67
Figura 45 – Variação do potencial elétrico de acordo com o pH no ensaio de potencial Zeta de para o solo PT _x	72
Figura 46 - Variação do potencial elétrico de acordo com o pH no ensaio de potencial Zeta de para o solo IN ₂	73
Figura 47 – Variação do potencial elétrico de acordo com o pH no ensaio de potencial Zeta de para o solo ML _k	73

Figura 48 - Concentração relativa dos óxidos determinados pelo método de espectrometria de fluorescência de raio X no solo PT _X	74
Figura 49 - Concentração relativa dos óxidos determinados pelo método de espectrometria de fluorescência de raio X no solo PT _G	74
Figura 50 - Concentração relativa dos óxidos determinados pelo método de espectrometria de fluorescência de raio X no solo IN ₁	75
Figura 51 - Concentração relativa dos óxidos determinados pelo método de espectrometria de fluorescência de raio X no solo IN ₂	75
Figura 52 – Concentração relativa dos óxidos determinados pelo método de espectrometria de fluorescência de raio X no solo ML _k	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Princípios da estabilização de solos com aditivos orgânicos e inorgânicos (adaptado de Yoder, 1957)	11
Tabela 2 – Limites de classes granulométricas em vigor em Portugal (LNEC, 1966).	18
Tabela 3 – Símbolos usados na classificação USCS (ASTM, 1985).....	21
Tabela 4 – Relação das propriedades dos solos com os limites de consistência (adaptado de Zolfaghari & Mosaddeghi, 2015).	22
Tabela 5 – Equações empíricas para a predição da permeabilidade (adaptado de Sezer, Göktepe, Altun, 2009)	29
Tabela 6 – Faixa de valores de condutividade hidráulica para vários materiais não consolidados (Fetter, 1988).....	30
Tabela 7 – Minerais das argilas, quartzo e calcite de acordo com os valores da sua atividade (Salas & Alpañes, 1971).	32
Tabela 8 – Classificação dos minerais de argila quanto à sua atividade (Fernandes, 2011).	32
Tabela 9 – Teor de água médio determinado para os diferentes solos.	62
Tabela 10 – Classes granulométricas em vigor em Portugal (LNEC, 1966).	65
Tabela 11 – Classificação dos coeficientes e uniformidade (C_u) e curvatura (C_c)	66
Tabela 12 – Classificação USCS dos diferentes solos determinada a partir dos ensaios de peneiração húmida e limites de consistência.	66
Tabela 13 – Limites de consistência determinados para o solo PT_x	68
Tabela 14 – Limites de consistência determinados para o solo IN_2	68
Tabela 15 – Limites de consistência determinados para o solo ML_k	69
Tabela 16 – Equivalente de areia determinado para os diferentes solos.	69
Tabela 17 – Calibração do picnómetro para o ensaio de massa específica.	70
Tabela 18 – Cálculos para a determinação da massa específica.	70
Tabela 19 – Valor de azul de metileno determinado para os diferentes solos.....	70
Tabela 20 – Condutividade elétrica determinada para os diferentes solos.....	71
Tabela 21 – Permeabilidade determinada para os diferentes solos a partir dos ensaios de peneiração húmida e sedimentação.	71
Tabela 22 – Valores de potencial eléctrico Zeta calculado para os diferentes solos.....	72
Tabela 23 – Amplitude máxima do potencial eléctrico determinado a partir do ensaio de potencial Zeta para os diferentes solos.....	73
Tabela 24 – Atividade do solo calculada para os diferentes solos a partir do ensaio de sedimentação.	77
Tabela 25 – Minerais de argila, de quartzo e de calcite presentes nos diferentes solos determinados a partir da atividade das argilas e da espectrometria de fluorescência de raio X.	77
Tabela 26 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios realizados sobre os solos em análise.	78

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

A presente dissertação enquadra-se na Unidade Curricular Dissertação/Projeto/Estágio (42 ECTS), do 2º ano, do Curso de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), do Instituto Politécnico do Porto (IPP). A elaboração e defesa pública da presente tese, em formato “Dissertação”, são imperativos para a conclusão do 2º ciclo e a consequente obtenção do Grau de Mestre.

O objetivo deste trabalho consistiu na análise das propriedades físicas e químicas de diferentes tipos de solos de modo a poder categorizá-los tendo em conta um contexto de aplicação à estabilização de solos em obra com recurso a polímeros.

Dada a estrutura polifásica dos solos e as consequências que daí advêm relativamente ao comportamento dos mesmos foram realizados, no decorrer deste estudo, vários ensaios laboratoriais, nomeadamente teor de água, ensaios granulométricos e de sedimentação, limite de consistência, equivalente de areia, azul de metileno, massa específica, potencial elétrico Zeta, permeabilidade, composição química e mineralógica.

Para o efeito, foram ensaiados provetes de cinco tipos de solos de diferentes origens (dois provenientes de Portugal, dois da Índia e um da Malásia). Por fim, foi elaborada uma Tabela que considera as principais relações entre as diversas propriedades analisadas.

1.1. ENQUADRAMENTO

Os engenheiros frequentemente enfrentam problemas construtivos em estruturas relacionadas com solos, que não possuem capacidade de carga para as solicitações impostas durante a construção ou na vida útil da estrutura. A performance negativa dos solos é geralmente atribuída à natureza e quantidade de material fino (< 0,074 mm) presente. Para melhorar o comportamento de estruturas construídas neste tipo de solos é necessário alterar as suas características intrínsecas. O objetivo de qualquer técnica de estabilização é aumentar a capacidade e rigidez do solo, melhorar a sua trabalhabilidade e reduzir o seu Índice de Plasticidade (Andrew, Fady et al., 2003).

No sentido mais alargado a estabilização inclui métodos de compactação, de pré consolidação e de drenagem, entre outros. Estes métodos podem ser muito variados, desde a substituição com solos de boa qualidade até métodos que envolvem processos químicos complexos. Podem ser utilizados agentes cimentantes, modificadores químicos, impermeabilizadores, retentores de água e químicos variados para este propósito.

As propriedades de cada uma destas misturas varia bastante. Cada uma tem o seu campo de aplicação particular e as suas limitações. A escolha de um método, em particular, depende principalmente do tipo de solo a trabalhar, as suas características físicas e o grau de melhoramento necessário para a aplicação. Devem ser considerados fatores financeiros e de disponibilidade na fase de seleção do método.

A diminuição da disponibilidade e o aumento dos custos de materiais de construção associados a climas económicos instáveis força os engenheiros a recorrer a soluções mais económicas para atingir resultados comparáveis a soluções mais correntes (Andromalos, Hegazy & Jasperse, 2000). Uma solução óbvia passa por usar matérias disponíveis localmente. No entanto, frequentemente esse tipo materiais não cumprem as especificações necessárias, portanto, é necessário encontrar alternativas.

Os polímeros em forma de emulsão representam um alargado espectro de materiais, a maioria à base de acetato de vinil ou copolímeros à base de acetato que apresentam várias vantagens face a outros métodos de estabilização, já que não requerem um solvente, são de fácil limpeza com recurso a água ou detergentes e não representam risco ambiental quando utilizados em massa (Newman & Tingle, 2004). Segundo Santoni et al. (2003), as emulsões de polímeros (após um período de cura) provêm um ganho significativo de resistência em siltes abaixo do nível freático, até mesmo igualando ou ultrapassando os ganhos relativos ao uso de cimentos para a estabilização.

A tarefa da identificação de um solo, particularmente aplicada à construção de fundações profundas (i.e. estacas), tem cada vez mais a necessidade de ser executada de uma forma expedita, já que esta é uma das primeiras fases construtivas numa empreitada. No entanto, verifica-se que não existem referências que o Engenheiro possa utilizar para ter uma ideia geral das características do solo com base em apenas alguns ensaios, o máximo que pode usar é a sua experiência para relacionar alguns dos resultados e intuição com base no enquadramento local.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é a determinação das características de um solo que são inter dependentes, de modo a poder expeditamente ter uma noção das características gerais de um solo através de um menor número de ensaios. Isto não passa, porém, simplesmente pela compilação das características básicas de um dado solo determinadas em laboratório (i.e. granulometria, limites de consistência, composição mineralógica e química, massa específica, potencial elétrico zeta, condutividade elétrica), mas também por incluir alguns ensaios mais expeditos (i.e. equivalente de

areia, azul de metileno) que possam mais facilmente ajudar na classificação de um dado estrato. Este tipo de classificação poderia ser aplicada à estabilização de solos recorrendo a soluções com polímeros no contexto da construção de fundações em profundidade (i.e estacas).

1.3. ESTRUTURA

No que diz respeito à sua organização, este trabalho é constituído por 7 capítulos.

No capítulo 1 faz-se a introdução geral ao tema da dissertação, dando um contexto geral à relevância do tema; é explicada a importância que uma classificação das características de um solo de forma expedita tem em contexto de obra, e a lacuna que existe quanto à unificação destes ensaios de uma forma prática com o objetivo de utilizar em campo; são delineados os objetivos da tese; e, a fechar o capítulo, encontra-se um resumo da estrutura e material abordado em cada capítulo.

No capítulo 2, com base na pesquisa bibliográfica realizada, apresenta-se a bibliografia na qual são encontradas relações entre os diversos ensaios apresentados. Também foi analisado em pormenor o campo da estabilização de solos, particularmente acerca da construção de fundações em profundidade (i.e. estacas) e as características dos solos que potencialmente influenciam o processo.

No capítulo 3 são apresentados os materiais objeto de estudo, a respetiva caracterização e descrição macroscópica destes.

No capítulo 4 encontram-se descritos os protocolos utilizados na realização dos ensaios laboratoriais, elaborados com base nas normas vigentes em Portugal. Quando tal não existe, foram utilizadas normas de outros países ou o manual de utilização dos equipamentos.

No capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados de todos os ensaios realizados sobre as amostras em estudo.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas no desenvolvimento desta tese. Também é exposta uma análise destes resultados aplicados à estabilização de solos relativamente à construção de fundações profundas e são apresentadas perspetivas futuras para o desenvolvimento de trabalhos relacionados com esta temática.

ESTADO DA ARTE

2. ESTADO DA ARTE

Segundo Scott & Schoustra (1968), os solos são na sua maioria resultantes da desintegração e decomposição das rochas constituintes da crosta terrestre. Quer essas rochas sejam formadas a grandes profundidades submetidas a elevadíssimas pressões, quer formadas à superfície da Terra devido à extrusão de magma, sempre que a rocha arrefece desenvolvem-se tensões no seu interior. Estas tensões resultam do seu arrefecimento, bem assim como a partir de movimentos de natureza tectónica. Consequentemente, todos os maciços rochosos apresentam uma maior ou menor fraturação.

Ainda segundo o mesmo autor, numa eventual exposição à superfície da Terra, o maciço rochoso fraturado é sujeito à ação física da água, vento e gravidade, começando a verificar-se o desligamento de blocos da massa rochosa original. Este movimento é geralmente acompanhado por nova fraturação e fissuração de cada bloco. Assim, qualquer massa rochosa tem tendência a ser gradualmente desintegrada em fragmentos cada vez mais pequenos, formando assim os solos. Este processo é designado como meteorização.

À medida que os grãos do solo se tornam cada vez mais pequenos a sua massa diminui de tal forma que, para minerais com uma determinada resistência, se atinge o limite a partir do qual as tensões resultantes do choque dos grãos com outra massa deixam de ser suficientes para provocar novas fraturas e subdivisões dos grãos. Assim, os processos físicos de formação dos solos têm um limite inferior no que diz respeito às dimensões médias das partículas dos solos em função da sua mineralogia.

Quanto menor a dimensão média das partículas do solo maior será a respetiva relação entre área superficial e volume, designada por superfície específica. Se for considerada uma partícula cubica com 1 cm de aresta e volume de 1 cm^3 , a sua área superficial será 6 cm^2 . Se essa partícula for fragmentada em 8 frações equivalentes de 0,5 cm de aresta a sua superfície específica passará a ser 12 cm^2 , enquanto que se forem consideradas 27 frações com 0,33 cm de aresta a sua superfície específica será 18 cm^2 (Figura 1).

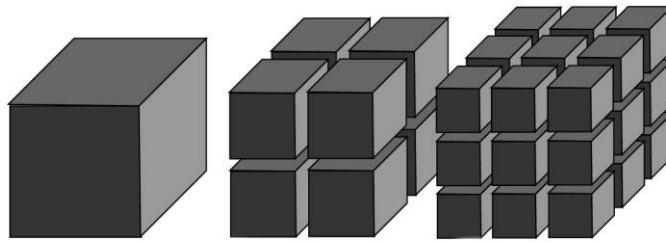


Figura 1 – Variação da área específica de uma partícula de volume constante (Eastern Illinois University, 2016).

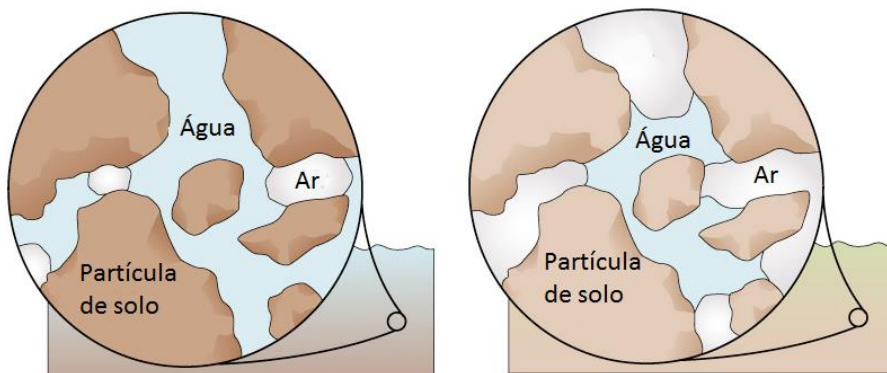


Figura 2 – Solo com diferentes quantidades de água e ar (adaptado de <http://mavdisk.mnsu.edu/larsop2/geog101/WeatheringandSoils/Soils/SoilWaterDiag.jpg>).

Há um conjunto de parâmetros que podem determinar as características físico-químicas que definem um solo. Algumas dessas características são a granulometria, limites de consistência, permeabilidade, massa específica, composição química e mineralógica, salinidade e potencial elétrico. Estas podem ser determinadas através de ensaios laboratoriais.

Também há alguns ensaios mais simples e expeditos, que apesar de não serem tão compreensivos, podem ser úteis para formar uma ideia básica do comportamento do solo, como o ensaio de azul de metileno e equivalente de areia.

De seguida será exposto um estudo extensivo destes ensaios, bem assim como do funcionamento de estabilizadores de solo.

2.1. ESTABILIZAÇÃO DE SOLO

A estabilização de solos é um conjunto de métodos físicos e químicos utilizados para o melhoramento da força, capacidade de carga e durabilidade, sob condições de tensão e teor de humidade adversas (Gidigas, 1976). Neste método são utilizadas misturas do solo original com

outro tipo de solos, cimentos do tipo Portland, cal, produtos betuminosos, silicatos e vários outros materiais ou químicos de origem natural ou sintética, orgânica ou inorgânica (Osinubi & Eberemu, 2009).

De acordo com Winterkorn & Pamukcu (1974) a estabilização de solos, de um ponto de vista geotécnico, pode ser dividida em 2 partes:

1. O melhoramento das características de um solo com vista à construção de fundações superficiais (e.g. estradas, pistas de aviação, parques de estacionamento e outras estruturas similares);
2. O melhoramento de solos para aplicação em fundações profundas (e.g. fundações para edifícios de grandes dimensões, barragens, portos e outras estruturas similares) através de tratamentos de injeção devido a dificuldades de acesso, tamanho ou localização da massa de solo.

O objetivo neste último tipo de aplicações passará por aumentar a força, capacidade de carga, resistência a ambientes erosivos, diminuir a permeabilidade, tendência à ocorrência de mudanças de volume, assentamentos, melhorar a estabilidade e assegurar a longevidade da estrutura. Antes de mais, é importante definir o método construtivo de um elemento de fundação profunda (i.e. estaca). A primeira operação a realizar *in situ* é a montagem da instalação de fabrico, distribuição e recuperação do elemento estabilizador fluídico (neste caso vamos considerar um polímero, mas o método é igual para lamas bentoníticas).

Este método funciona pelo equilíbrio das pressões hidrostáticas das paredes internas de escavação. A furação é realizada através de um trado suspenso. Já que os solos característicos do emprego deste método não são coerentes é utilizado um balde para a remoção do solo. À medida que é removido o solo este é substituído pela solução do polímero para estabilizar as paredes do furo. Depois de atingida a profundidade do furo é realizada a sua limpeza.

A armadura é colocada antes da betonagem, sendo esta realizada de seguida. Já que o fluído é menos denso que o betão, à medida que este é colocado o polímero é retirado através de bombagem.

A Figura 3 apresenta um diagrama do processo construtivo de uma estaca com recurso a solução de polímero.

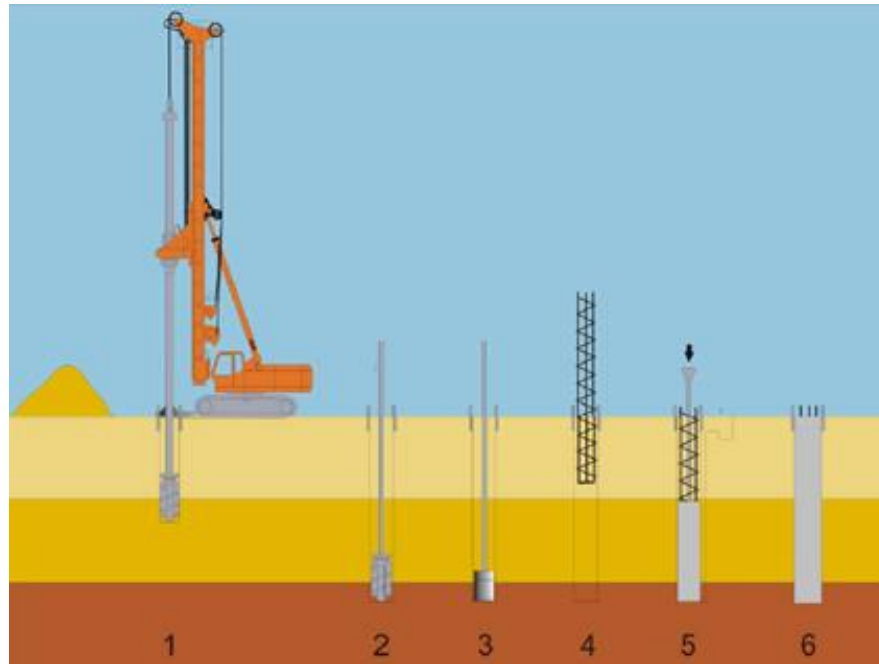


Figura 3 – Fases do processo construtivo de uma estaca moldada por solução de polímero (1 e 2 - Furação com trado suspenso recorrendo com recurso a polímero de estabilização; 3 - Utilização de balde para remoção do solo; 4 - Inserção da armadura; 5 - Betonagem; 6 - Estaca finalizada) (<http://www.terratest.es>).

Os diferentes usos de um solo trazem diferentes requisitos no que diz respeito à força mecânica e à resistência a elementos externos. A estabilização de um talude ou de um aterro contra a erosão é um assunto vastamente diferente da estabilização de um solo para a construção de uma estrada para transportar equipamento industrial pesado.

As condições ambientais na altura da construção, as variações periódicas destas condições com o tempo e a amplitude destas mudanças podem influenciar a integridade do sistema significativamente.

Algumas destas condições são temperaturas extremas, submersão, exposição solar, ciclos de gelo e degelo, grau de saturação, contacto com água doce ou salgada, ciclos de saturação e secagem, lixiviação, intrusão química, preparação do material e sequência construtiva (Winterkorn & Pamukcu, 1974). Podem ser identificados dois tipos principais de estabilizadores:

- *Estabilizadores granulares*: são um conjunto de métodos físicos e químicos no qual a estrutura granular é modificada com materiais de natureza cimentosa;
- *Estabilizadores químicos*: aplica-se quando as interações químicas, ao invés das físico-químicas, têm um papel predominante. Uma série de reações químicas, que podem ser descritas por meio de equações químicas, ocorrem entre o solo e os aditivos. Algumas das

reações mais básicas que podem ocorrer são hidratação, troca iônica, cimentação, floculação, precipitação, polimerização, oxidação e carbonização.

Yoder (1957) propôs que os principais fatores que controlam a estabilidade de misturas de solo e agregado são: 1) a distribuição das partículas do agregado de diferentes tamanhos, 2) a proporção de partículas finas (>0,075 mm) do agregado e 3) a plasticidade dos materiais finos.

A escolha de um determinado elemento estabilizador dependerá do contexto geológico, bem assim como do propósito da obra. A quantidade de estabilizador é frequentemente determinada através de ensaios de laboratório arbitrários no qual são simuladas as condições de erosão e outros fatores encontrados em campo.

As alterações físicas dos solos resultantes da aplicação dos elementos estabilizadores devem-se à reação entre os químicos, os agregados e os componentes mineralógicos. Por exemplo, os mecanismos pelos quais o solo é reforçado numa mistura com cimento depende do desenvolvimento de aglomerados de cimento hidratado e partículas de solo que encapsulam vazios numa estrutura tridimensional (Gillot, 1968).

Relativamente à estabilização de solos por meio de cal, as alterações devem-se principalmente às reações químicas entre a cal e os minerais argilosos. Os minerais que mais reagem com cal são alumina e sílica. Esta reação realiza-se a longo prazo, daí ser necessário um tempo de cura para que a mistura seja mais resistente. Este fenómeno é denominado de “ação polzânica”. Esta reação vai depender de fatores como a quantidade de cal, o tipo de solo e o tempo de cura.

Há vários ensaios que visam verificar a adequação de um processo de estabilização, baseados principalmente na perda de massa depois de um número de ciclos de congelamento e degelo ou secagem e molhagem. Também são verificados o aumento de teor de humidade, alterações de volume, resistência à compressão uniaxial, ensaio de carga de Califórnia, força tênsil, erosão e inspeção visual (Gidigas, 1976).

A Tabela 1 refere os diferentes tipos de aditivos que são utilizados na estabilização de solos e algumas das suas características.

Tabela 1 – Princípios da estabilização de solos com aditivos orgânicos e inorgânicos (adaptado de Yoder, 1957)

TIPO	ADITIVO	PRINCIPAL MECANISMO DE ESTABILIZAÇÃO	SITUAÇÃO A QUE MELHOR SE ADEQUA	LIMITAÇÕES	PROCEDIMENTO DE APLICAÇÃO
Agentes de cimentação	Cimento Portland	Principalmente hidratação, alguma modificação dos minerais argilosos	Solos arenosos ou argilas magras	Solos orgânicos	Pulverização, compactação da mistura, cura
	Cal	Alteração da água aderente, floculação, química	Materiais granulares ou argilas magras	Ciclos de congelamento-descongelamento podem ser destrutivos	Pulverização, compactação da mistura, cura
	Cal e cinzas volantes	Ação pozolânica da cal e da sílica, alguma modificação nos minerais argilosos	Materiais granulares ou argilas magras	Quantidade de cinzas volantes pode ser elevada	Pulverização, compactação da mistura, cura
	Silicato de sódio	Solidificação por gelificação	Areias	Tempo de ação	Injeção
Modificadores	Cimento	Alteração das argilas e da água aderente	Materiais com bastantes óxidos metálicos e argilas	Aumento da força pode ser reduzido	Pulverização, compactação da mistura
	Cal	Alteração das argilas e da água aderente	Materiais com bastantes óxidos metálicos e argilas	Aumento da força pode ser reduzido	Pulverização, compactação da mistura
	Betumes	Retardamento da absorção de água	Materiais com bastantes óxidos metálicos	Aumento da força pode ser reduzido	Pulverização, compactação da mistura
Impermeabilizadores	Betumes	Retardamento da absorção de água por revestimento das partículas	Solos arenosos ou má qualidade dos materiais da base, algumas argilas	Limitado pela plasticidade do solo	Mistura, cura, compactação
	Membranas	Impede o movimento de água livre e vapor de água	Solos que possam ser melhorados por compactação	A construção pode ser difícil	Compactação até elevada densidade
Retentores de água	Cloreto de cálcio	Propriedades deliquescentes, ponto de congelamento mais baixo, trocas de base	Agregado graduado	Parasitas	Espalhamento a seco ou misturado com água
	Cloreto de sódio	Propriedades deliquescentes, ponto de congelamento mais baixo	Agregado graduado	Parasitas	Espalhamento a seco ou misturado com água
	Compostos orgânicos cationicos	Altera os minerais argilosos atuando como um agente hidrofóbico	-	Misturar em pequenas quantidades pode ser difícil	Mistura e compactação
Químicos diversos	Resinas Acrilato de cálcio Sulfito de lignina	-	-	Limitados a situações especiais	-

Quando são utilizados estabilizadores sob a forma de polímeros durante a fase construtiva são monitorizados diversos fatores do fluido que têm de estar compreendidos entre determinados valores de referência como a viscosidade (60 – 65 s), pH (10 – 12), teor de areia em suspensão ($\leq 3\%$) e densidade (1,00 – 1,08 g/cm³, sendo que antes da betonagem a densidade deve ser $\leq 1,04$).

Estão disponíveis no mercado uma série de produtos de estabilização de solos não tradicionais que não são com base em cálcio, e portanto são alternativas potencialmente viáveis para o tratamento destes solos com elevadas concentrações de sulfatos.

Estes estabilizadores são normalmente vendidos sob a forma de concentrado líquido, que é diluído em água no local de obra e poderá ser espalhado pelo solo antes de ser realizada a compactação ou pode-se proceder à sua injeção sob pressão para tratar camadas de solo mais profundas.

Já que existe uma elevada economia de transporte estas soluções até podem ser atrativas em casos em que a presença de sulfatos não é um fator limitante (Katz et al., 2001). Alguns destes produtos são classificados como eletrólitos, enzimas, polímeros acrílicos e fixadores minerais. Estes produtos podem funcionar de variadas formas, incluindo o encapsulamento de minerais argilosos, troca de catiões interlinear, decomposição dos minerais argilosos através da segregação da água da camada dupla, ou por expansão interlinear com subsequente aprisionamento da humidade (Scholen, 1992).

Apesar das potenciais vantagens oferecidas pelos estabilizadores de solos não tradicionais, a maioria dos engenheiros tem relutância em especificar a sua utilização. Segundo Scholen (1992), uma das preocupações principais prende-se com a falta de estudos independentes relativos à eficácia destes produtos.

Principalmente no que diz respeito a casos de estudo, a maior parte destes trabalhos que são utilizados para promover os benefícios da utilização destes produtos comerciais são, frequentemente, pouco mais do que testemunhos mal documentados. Outro obstáculo é a falta de protocolos de ensaio que possam prever com precisão a performance em obra.

São necessários protocolos de ensaio que possam qualificar quanto um determinado estabilizador de partículas pode melhorar as propriedades de um solo encontrado num dado projeto. Além disso, as informações fornecidas pelos fabricantes muitas vezes são inadequadas.

Naturalmente, muitos fabricantes consideram a composição química do seu produto como patenteada, no entanto, isto torna difícil a verificação independente dos mecanismos de estabilização e a previsão dos potenciais campos de aplicação que se poderiam beneficiar com a utilização destes compostos.

Por fim, verifica-se a falta de conhecimentos na área da engenharia no seio das empresas fabricantes, pelo que o apoio em obra se torna bastante limitado (Katz et al., 2001).

Em alguns casos que envolvam solos com grandes quantidades de sulfatos a estabilização com base em químicos ricos em cálcio comumente usados conduziu a uma expansão e consequente elevação do solo (Mitchell, 1986).

Estes fenómenos aparentemente ocorrem quando o cálcio adicionado reage com os sulfatos e os óxidos de alumínio presentes no solo, formando uma série de hidratos de cálcio-alumino-sulfatados que produzem etringite e taumasite. Esta reação provoca a expansão volumétrica significativa (Mitchell & Dermatas, 1992).

A técnica de grouting é um método usado na estabilização de fundações profundas (i.e. estacas) no qual o melhoramento desejado às propriedades físicas e mecânicas é alcançado através de injeções *in-situ* de um estabilizador, e pode ser aplicada tanto a rochas como a solos. Quanto às rochas basicamente, impermeabiliza as zonas onde há uma rede de fissuração e fragmentação excessiva.

Relativamente a solos há um sem numero de aplicações, como reforço *in situ*, estabilização e densificação de fundações profundas, sistemas de barreira para controlo do fluxo de água e medidas corretivas de problemas que surgem após a construção devido a depósitos pouco consolidados. O estabilizador é normalmente uma mistura de aditivos ou químicos que têm como objetivo densificar ou impermeabilizar o solo (Winterkorn & Pamukcu, 1974).

A utilização de cimentos para provocar o endurecimento efetivo do solo é muitas vezes restringida devido aos custos associados, e portanto, apenas são utilizadas pequenas quantidades deste material de modo apenas modificar as características do solo.

Cimentos e cal alteram a água aderente às partículas do solo, modificando os minerais das argilas e portanto diminuindo o seu índice de plasticidade. Materiais betuminosos são frequentemente utilizados em agregados que contenham um excesso de finos, nos quais o papel dos materiais betuminosos é atrasar a absorção de humidade da fração argilosa na mistura de solo e agregado (Gidigas, 1976).

Os princípios fundamentais que estão em jogo no que toca à estabilização química de um solo são cimentação, reações de troca iónica, preenchimento de vazios e revestimento, e consequente ligamento, das partículas de solo.

Alguns compostos que podem ser considerados nesta categoria são cimento de Portland, cal, asfalto, silicatos, resinas, ácidos, lignina, óxidos metálicos, resíduos de carvão siliciosos, resíduos de inceneração e alguns compostos cáusticos (Ingles & Lim, 1980).

Segundo WES (1977) há outra série de estabilizadores químicos alternativos:

- *Silicatos de sódio*: relativamente à estabilização de solos, reagem com os sais de cálcio em solução na água e formam um gel insolúvel de silicatos de cálcio. O elevado pH que resulta desta reação também pode promover a dissolução de silicatos da superfície das partículas de solo, assim contribuindo para a cimentação do solo. A estabilização com silicatos de sódio funciona bem com areias siliciosas e quando argilas de baixa atividade como a caulinite, no entanto isto já não ocorre com argilas de elevada actividade, como a montmorillonite.
- *Óxidos de ferro*: já foram utilizados (Ingles & Lim, 1980) para diminuir a sensibilidade à água de um solo.
- *Cloretos* (CaCl_2 , NaCl_2 e MgCl_2): são utilizados de uma forma primária no controlo de poeiras em estradas devido ao seu efeito de redução de evaporação de água. São também utilizados como agentes estabilizadores para proceder ao degelo de solos congelados, e reduzir os limites de consistência de solos argilosos. Isto ocorre devido à adesão e floculação das partículas, que aumenta o seu tamanho aparente. Este mesmo efeito aumenta a permeabilidade de um solo, que o torna menos suscetível à capilaridade e, portanto, há menos riscos associados ao congelamento. O cloreto de cálcio reduz a força de um solo, e pode ter efeitos substanciais em solos secos. Já que os cloretos são solúveis, correm o risco de serem drenados por ação de água das chuvas se não forem corretamente protegidos.
- *Ácido fosfórico* (H_3PO_4): aumenta a resistência dos solos à água, resultando num aumento da força e resistência à erosão. O ácido fosfórico reage com os minerais argilosos, formando compostos de alumínio e ferro insolúveis em água, como metafosfato de alumínio. À medida que se dissolve no ácido residual, o metafosfato de alumínio precipita num gel, resultando numa ação de cimentação. Este método não pode ser utilizado para solos que contenham cálcio, já que a maior parte do ácido fosfórico será consumido na neutralização do carbonato de cálcio.
- *Furfural-anilina*: é um polímero que é borrifado no solo sob a forma de emulsão aquosa. O efeito estabilizador do material é tornar o solo hidrofóbico, portanto diminuindo a capacidade de absorção de água e a sua expansão. Quando o furfural e a anilina reagem formam uma resina, ou polímero, que promove a cimentação entre as partículas de solo através de reações de troca iónica (catiões orgânicos substituem os catiões metálicos da fração argilosa) e revestimento das partículas o solo torna-se repelente à água.

Assim, tendo em conta as diversas variáveis relacionadas com a estabilidade foram selecionadas as propriedades dos solos a avaliar neste no intuito da respetiva parametrização para o fim em vista. Entendeu-se caracterizar, portanto, para os solos em análise os parâmetros que se indicam em seguida.

2.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica de partículas sólidas compreende a determinação do tamanho das mesmas, bem como da frequência com que ocorrem numa determinada classe ou faixa de tamanho.

Uma partícula é um corpo coerente ligado por uma superfície definida. Os materiais podem consistir num único tipo de material com propriedades uniformes, ou em partículas menores aglomeradas, podendo as propriedades de cada uma ser muito diferentes. Os solos são formados a partir de determinadas condições e as partículas são, até um certo ponto, um produto dessas circunstâncias (Loveland & Whalley, 2001).

As partículas podem ter várias formas que influenciam determinadas propriedades, tais como fluidez, empacotamento e interação com fluidos (Figura 4).

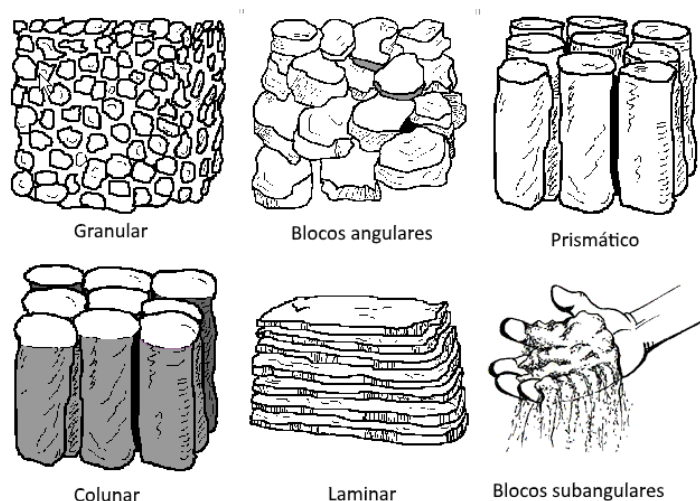


Figura 4 – Diferentes tipos de estrutura granular dos solos (University of Hawai at Mānoa, 2016).

Portanto, a medição de tamanho de uma mesma partícula através de diferentes técnicas pode dar valores diferentes, relativamente à medida em como a forma dessa partícula se distancia de uma esfera, daí a razão de se aplicarem fatores de correção para transformar as medidas obtidas de uma técnica para outra, e vice-versa. Quando é necessária uma análise em faixa granulométrica ampla, que abarque dois métodos experimentais, é comum fazer-se uma varredura com sobreposição

parcial, visando compatibilizar as duas curvas, em termos de concordância geométrica na região de transição dos métodos utilizados (Lima & Luz, 2001).

Existem diversas técnicas de análise granulométrica que se aplicam a faixas granulométricas bem definidas. A escolha da técnica adequada para se efetuar a análise granulométrica de um determinado material vai depender do tamanho das partículas (Lima & Luz, 2001).

Os solos podem conter dimensões de tamanhos bastante variáveis, até uma dimensão mínima $< 1 \mu\text{m}$. Para as partículas maiores facilmente distinguíveis a nível macroscópico, uma medida grosseira de determinar a granulometria é a dimensão máxima de uma partícula considerando dois pontos - em muitos casos, para estes materiais apenas é necessária uma escala para estas determinações. No entanto, é relativamente a partículas de menores dimensões que são concentradas mais atenções, já que apresentam mais influência nos comportamentos físicos e químicos dos solos (Loveland & Whalley, 2001).

As partículas argilosas apresentam algumas propriedades que as diferenciam de outras partículas de maiores dimensões. Para além do seu reduzido tamanho a sua forma é tipicamente laminar e são quimicamente muito ativas. Isto deve-se ao facto de terem uma elevada superfície específica, como já foi referido.

Uma significativa quantidade de moléculas da argila estarão disponíveis para reagir com outros compostos, já que se encontram junto à superfície, em contacto com o exterior. Devido à natureza e arranjo dos átomos nestas moléculas, é conferida às partículas cargas elétricas negativas nas faces e cargas elétricas positivas nos bordos, que por sua vez têm grande predominância de cargas negativas.

O conjunto de cargas elétricas que envolve as sediadas na superfície da partícula e as que formam a camada difusa na periferia da mesma designam-se por dupla camada elétrica (Figura 5). Daí ocorre a propensão para as partículas de argila interagirem com o exterior por meio de forças de natureza elétrica, atraindo iões positivos (catiões) de sais dissolvidos na água (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} , etc.), bem assim como moléculas de água, que são dipolares.

As moléculas de água mais próximas da superfície da partícula estão submetidas a tensões elevadíssimas, encontrando-se praticamente no estado sólido. Esta é designada como água adsorvida, e não pode ser libertada por secagem em estufa (Fernandes, 2011).

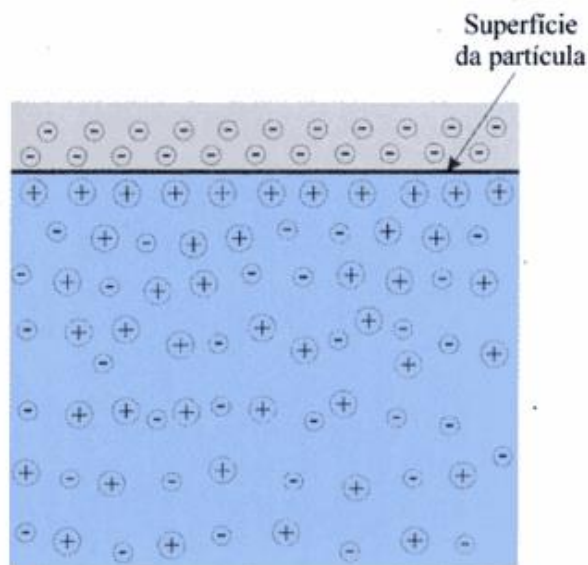


Figura 5 – Dupla camada elétrica numa partícula de argila (Fernandes, 2011).

Para partículas que possuem uma forma geométrica esférica, cilíndrica ou cúbica, a determinação do tamanho das mesmas dá-se, respetivamente, pela medida do seu diâmetro, do diâmetro da base e altura e do comprimento da aresta (Lima & Luz, 2001). A forma das partículas não esféricas pode ser comparável às esféricas através do seu volume. Por exemplo, uma partícula cúbica com 1 cm de aresta tem o mesmo volume que uma esfera com 1,24 cm de diâmetro. Este é o conceito de diâmetro equivalente. Portanto o comportamento de esferas de diferentes diâmetros pode ser relacionado com partículas de diâmetro equivalente semelhantes.

No entanto, as limitações deste conceito tornam-se evidentes quando é comparada uma partícula esférica com uma partícula longa e delgada com o mesmo volume (Loveland & Whalley, 2001).

É de maior interesse analisar a proporção de partículas (em percentagem de peso) inseridas numa determinada classe relativa ao tamanho. É comum descrever uma determinada camada de solo de acordo com a classe de tamanho predominante. Estas classes são identificadas por nome (argila, silte, areia e seixo/cascalho), no entanto há variações entre diferentes países quanto aos limites considerados para cada classe (Loveland & Whalley, 2001). Em Portugal, os limites considerados são os considerados na Tabela 2.

Tabela 2 – Limites de classes granulométricas em vigor em Portugal (LNEC, 1966).

SEIXO GROSSO	20 - 60 mm
SEIXO MÉDIO	6 – 20 mm
SEIXO FINO	2 – 6 mm
AREIA GROSSA	0,6 – 2 mm
AREIA MÉDIA	0,2 – 0,6 mm
AREIA FINA	0,06 – 0,2 mm
SILTE GROSSO	0,02 – 0,06 mm
SILTE MÉDIO	0,006 – 0,02 mm
SILTE FINO	0,002 – 0,006 mm
ARGILA	< 0,002 mm

A distribuição de partículas em diferentes classes de tamanhos pode ser usada para construir curvas de distribuição granulométrica. No entanto, aquando da utilização destas curvas para a obtenção de valores interpolados, é necessário ter em atenção que a qualidade destas depende dos métodos utilizados na obtenção dos dados e do número de pontos utilizados na sua construção.

Traçada a curva granulométrica pode utilizar-se o diagrama de Feret (Figura 6) para definir o termo mais apropriado para a designação do solo.

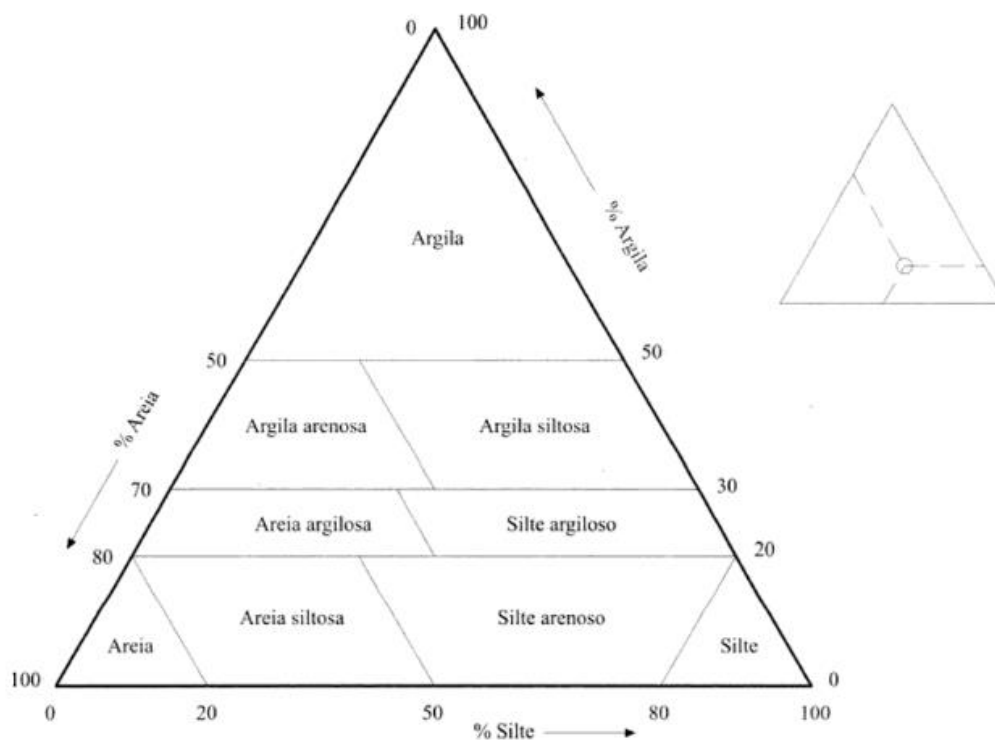


Figura 6 – Diagrama de Feret para a designação de solos (Fernandes, 2011).

A partir da curva granulométrica também é possível determinar o diâmetro efetivo D_{10} , que representa o diâmetro para o qual existem 10% de partículas de diâmetro efetivo; coeficiente de uniformidade C_u (1), que representa a variedade de dimensões que o solo possui, sendo que $C_u > 4$ a 6 é um solo bem graduado, $C_u \approx 1$ é um solo uniforme e $C_u < 1$ é um solo mal graduado.; o coeficiente de curvatura C_c (2), que está relacionado com a forma da curva granulométrica entre D_{10} e D_{60} , sendo que $C \approx 1$ a 3 corresponde a um solo bem graduado (Fernandes, 2011) (Figura 7).

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (1)$$

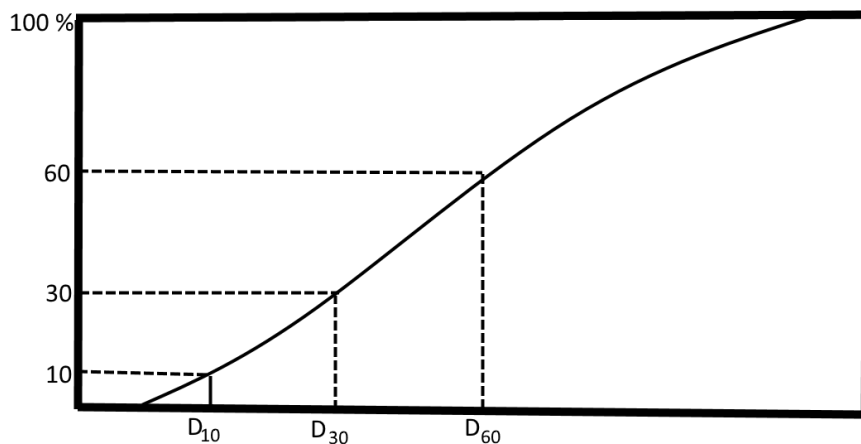


Figura 7 – Determinação dos valores de D_{10} , D_{30} e D_{60} de um solo (Fernandes, 2011)

Quando são estudados solos não existem alternativas práticas à peneiração, para partículas compreendidas entre 1 mm – 10 cm. Há peneiros disponíveis com aberturas 5 μm – 125 mm com abertura quadrada ou redonda, dependendo da dimensão.

Os peneiros de abertura redonda apenas deixam passar partículas de acordo com a sua abertura radial, enquanto os de abertura quadrada funcionam de acordo com a distância entre faces paralelas e a diagonal entre cantos. Os peneiros são fabricados tendo em conta valores de tolerância, não valores absolutos, portanto, a abertura pode variar entre um dado valor limite. Por exemplo, um peneiro de abertura nominal 2 mm pode ter uma variação média de abertura de $\pm 3\%$ (1,94 – 2,06 mm). Uma prática comum é descrever um peneiro pelo seu número de *mesh* (o número

de arames por polegada linear) que, em teoria, é mais um do que o número de buracos para a mesma distância. No entanto, isto induz em erro, uma vez que, sem o conhecimento do diâmetro do arame não é possível determinar a abertura do peneiro através do número de *mesh*. A utilização deste valor também vai contra a utilização do Sistema Internacional de unidades, portanto é desincentivado (Loveland & Whalley, 2001).

A peneiração torna-se mais laboriosa abaixo de aberturas de aproximadamente 30 μm , visto que a área de buracos desce significativamente relativamente à área total do peneiro (Figura 8) – por isso, a peneiração a seco não é recomendada. Em alternativa, pode ser utilizada a peneiração por jato de ar, ou, para materiais com tendência a se aglomerar, pode se optar pela peneiração húmida (Loveland & Whalley, 2001).

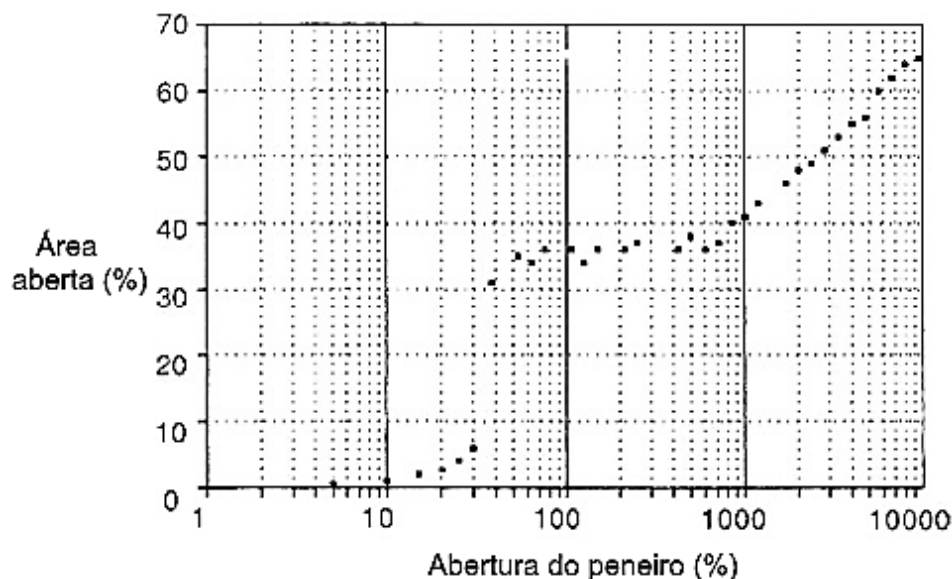


Figura 8 – Relação entre a área aberta e a abertura para peneiros quadrados (adaptado de Loveland & Whalley, 2001).

O Sistema de Classificação Unificada de Solos (USCS) é uma classificação usada em engenharia e geologia para descrever a textura e o tamanho das partículas dos solos. A classificação pode ser aplicada à maioria dos materiais não consolidados e é representada por um símbolo com duas letras (ASTM, 1985). A Tabela 3 apresenta a nomenclatura deste sistema de classificação.

Tabela 3 – Símbolos usados na classificação USCS (ASTM, 1985).

PRIMEIRA OU SEGUNDA LETRA		SEGUNDA LETRA	
LETRA	DEFINIÇÃO	LETRA	DEFINIÇÃO
G	Cascalho	P	Mal graduado (tamanho das partículas uniforme)
S	Areia	W	Bem graduado (tamanho das partículas diversificado)
M	Silte	H	Elevada plasticidade
C	Argila	L	Baixa plasticidade
O	Orgânico		

Se um solo tem 5-12% de material fino que passa no peneiro 0,074 mm, tanto o tamanho das partículas como a sua plasticidade tem um efeito significativo nas propriedades do solo de um ponto de vista da engenharia - assim, pode ser utilizada notação da primeira coluna para as duas letras, por exemplo GW-GM corresponde a “cascalho bem graduado com silte”.

2.3. LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Segundo Fernandes (2011), para os solos granulares é importante a comparação do índice de vazios natural com os valores de referência do índice de vazios ($e_{máx}$ e e_{min}) dada a utilidade do mesmo na antecipação do comportamento mecânico dos solos, ainda que esta seja apenas qualitativa.

A consistência de um solo indica a resistência do mesmo a deformações, quando exposto a forças mecânicas. Com base no conteúdo de água gravimétrica, Atterberg (1911) definiu três limites de consistência: limite de liquidez (W_L), limite de plasticidade (W_P) e limite de retração (W_c). Os índices de consistência de um solo representam os valores limite de água de solo, a partir dos quais determinados comportamentos mecânicos ocorrem.

Na fase plástica, quantificada pelo Índice de Plasticidade (I_P), o comportamento mecânico do solo é plástico (irreversível) sem criar fissuras quando esforçado. No estado semi sólido (valor de teor em água entre W_c e W_P) o solo tem um comportamento friável. Pode-se considerar que um solo com $I_P < 7$ pode ser usado como solo de fundação, $7 < I_P < 15$ é um solo medianamente plástico, e $I_P \geq 15$ o solo já é muito plástico e portanto inspira cuidados (Campbell, 2001; McBride, 2008).

$$I_P = W_L - W_P \quad (2)$$

Os índices de limites de consistência de Atterberg são usados para a classificação de solos coesivos. Na classificação USCS são utilizados os valores de limite de líquidos (W_L) e de índice de plasticidade (IP). Estes valores também fornecem informações para a interpretação de várias propriedades físicas de solos, como a resistência ao corte direto, compressibilidade e potenciais de expansão e retração. Estes valores são essenciais para a aplicação de estruturas no solo, e.g. edifícios e estradas (Zolfaghari & Mosaddeghi, 2015). Os efeitos das propriedades dos solos nos limites de consistência de Atterberg encontram-se amplamente documentados (Tabela 4).

Tabela 4 – Relação das propriedades dos solos com os limites de consistência (adaptado de Zolfaghari & Mosaddeghi, 2015).

AUTOR	CORRELAÇÃO	LIMITE DE CONSISTÊNCIA
de la Rosa (1979)	Conteúdo de argilas, matéria orgânica e a capacidade de troca de cátions em solos da Flórida, EUA.	IP – índice de plasticidade
De Jong et al. (1990) e Mbagwa & Abeh (1998)	Conteúdo de argilas em solos no sul de Saskatchewan, Canada e regiões tropicais da Nigéria, respetivamente.	IP – índice de plasticidade W_L – limite de liquidez W_P – limite de plasticidade
Odell et al. (1960)	Conteúdo de argilas, matéria orgânica e montmorillonite na fração argilosa.	IP – índice de plasticidade W_L – limite de liquidez
Seybold et al. (2008)	Conteúdo de argilas e capacidade de troca de cátions recorrendo a uma base de dados nos EUA.	IP – índice de plasticidade W_L – limite de liquidez
Keller & Dexter (2012)	Conteúdo de argilas mas não com a matéria orgânica recorrendo a uma base de dados de vários países.	IP – índice de plasticidade W_L – limite de liquidez W_P – limite de plasticidade

2.4. TEOR DE ÁGUA

Um dos maiores fatores de instabilidade de solo em obra advém da ação da água. A água adere às partículas e, quando o solo está abaixo do nível freático a água intersticial, diminui o atrito entre as partículas, conseqüentemente diminuindo o ângulo de atrito interno do solo. Este fenômeno é mais vincado em solos com elevado teor de finos, já que nestes a superfície específica é mais elevada, o que faz com que uma dada quantidade de água tenha um efeito muito mais significativo, comparativamente a um solo mais arenoso.

Este fator, entre todos os aqui analisados, é o que tem maior variação em obra, já que o teor de água de um solo dependerá da profundidade a que se encontra (quanto mais profundo será mais provável que chegue ao nível freático) e, principalmente, depende do clima da região e da altura do ano.

2.5. EQUIVALENTE DE AREIA

O equivalente de areia (EA) é um ensaio que visa determinar de uma forma expedita as proporções relativas de materiais finos (< 0,074 mm) num determinado solo. O próprio termo “equivalente de areia” transmite a noção que um solo é composto por partículas de diferentes tamanhos, sendo que as partículas mais grosseiras (e.g. areias) têm um comportamento desejável de um ponto de vista da engenharia, enquanto que, se o solo apresentar uma grande quantidade de partículas de menor dimensões (e.g. siltes e argilas,) pode provocar uma série de problemas em obra, já que este tipo de solos são facilmente deformáveis quando submetidos a cargas. Portanto, relativamente a obras superficiais, se não forem tomadas medidas preventivas existirão assentamentos diferenciais, podendo pôr em risco toda a estrutura construída (Petkovšek et al., 2010).

Este ensaio destina-se também à avaliação de solos a aplicar na pavimentação de estradas. Se um agregado tiver uma grande quantidade de finos estes absorverão o ligante e revestirão as partículas maiores, não permitindo que seja realizada uma apropriada ligação com o agregado (Tarrer & Wagh, 1991).

Um solo com uma elevada quantidade de finos terá um valor de EA baixo, enquanto que um solo semelhante a uma areia lavada (muito baixo teor de finos) apresentará um resultado próximo de 100%. Uma elevada quantidade de finos pode contribuir para a falta de estabilidade de um solo.

A Figura 9 apresenta uma representação visual do aspeto do ensaio de equivalente de areia para solos com diferentes teores de finos.

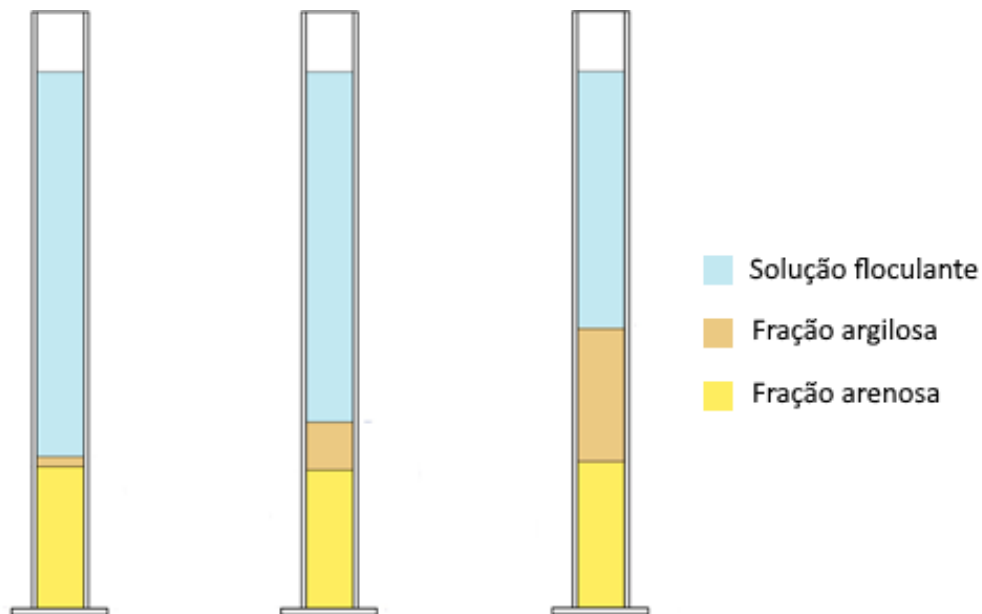


Figura 9 – Ensaio de equivalente de areia para solos com diferentes teores de finos (adaptado de http://www.fastonline.org/cd3wd_40/cd3wd/construc/h2449e/en/b713_5.htm).

2.6. AZUL DE METILENO

De forma similar ao ensaio de equivalente de areia, o ensaio do azul de metileno visa quantificar os finos num solo de uma forma expedita, apropriada ao uso em obra. Este ensaio utiliza o corante ‘Azul de Metileno’, uma grande molécula orgânica que se fixa à superfície de uma partícula de solo. A quantidade de azul de metileno que é adsorvida pelo solo mede a área de superfície específica de um solo. Assim, já que solos com elevado teor de finos têm uma elevada área específica, quanto maior for a quantidade de azul de metileno utilizada, maior será o teor de finos do solo. Este corante orgânico é adsorvido pelo solo, formando uma camada mono molecular quase que completa sobre a superfície dos minerais de argila, permitindo dessa forma, uma vez conhecidas as dimensões da sua molécula, conhecer a sua área total recoberta (Hang & Brindley, 1970).

Este valor é importante para a caracterização da força de ligação a seco das partículas, plasticidade (quanto maior o valor de Azul de metileno maior será o índice de plasticidade do solo), adsorção de alguns compostos, bem assim como o comportamento de expansão-retração. Em vista disso, a área específica do solo depende de fatores como a mineralogia, composição orgânica e dimensão das partículas (Yukselen & Kaya, 2008).

2.7. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A Espectrometria por Fluorescência de Raios X (FRX) é uma ferramenta dinâmica e extremamente proficiente para a determinação quantitativa e qualitativa da presença de elementos químicos em diversos tipos de amostras, de interesse biológico, industrial, geológico e ambiental.

Esta técnica, uma vez não destrutiva e por possibilitar a análise de vários elementos simultaneamente, de modo rápido e a baixo custo, tem um elevado potencial de aplicação em diversas áreas (Manceau, Marcus & Tamura, 2002).

Este é um processo quantitativo fundamentado na medida das intensidades dos Raios X característicos, emitidos pelos elementos que constituem a amostra, quando excitada por partículas ou ondas eletromagnéticas. Os Raios X emitidos excitam os elementos que constituem a amostra, elementos esses que por sua vez irradiarão linhas espectrais de energias características do elemento e, cujas intensidades, estão relacionadas com a concentração do elemento na amostra (Spínola, 2015)(Figura 10).

Os limites de detecção dos elementos analisados dependem da energia dos Raios X fluorescentes recebida pelo analisador (consequência do número atômico do elemento), do tipo e energia da fonte de excitação, do tipo de matriz, de interferências interespectrais, da capacidade de resolução do equipamento e da duração dos ensaios.

Outros fatores podem condicionar a qualidade dos resultados das análises realizadas, como o teor em água da amostra, a temperatura ambiente, o incorreto posicionamento do analisador, uma imensa variedade nas propriedades físicas (dimensão, uniformidade, etc.) das partículas ou a presença simultânea de elementos químicos com concentrações muito distintas (Queirós, 2011).

Ainda segundo o mesmo autor, a FRX está fundamentada na emissão atômica e no efeito fotoelétrico, ou seja, quando um átomo é submetido a um processo de irradiação por uma fonte de Raios X, um elétron pode ser expulso das camadas eletrônicas (K/L/M) mais internas (efeito fotoelétrico) gerando assim uma “vaga”.

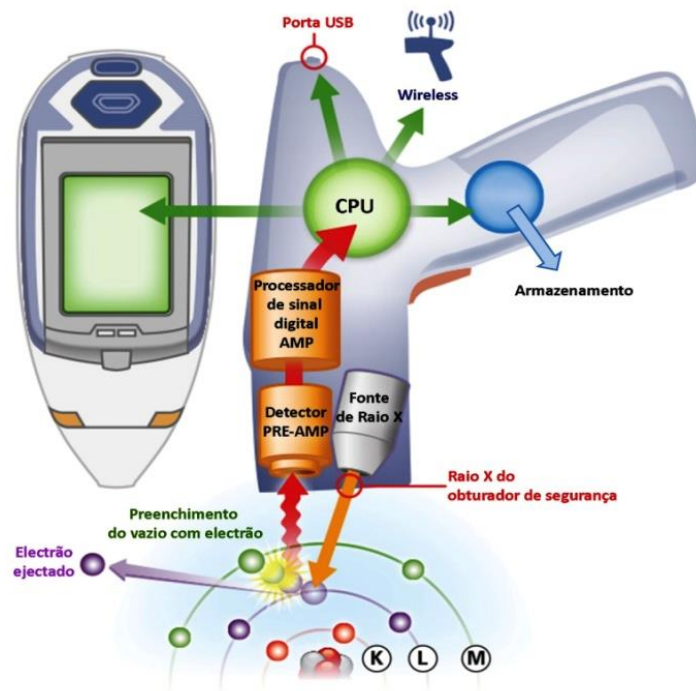


Figura 10 – Princípio de funcionamento do equipamento de análise química quantitativa de fluorescência de raios X. (adaptado de Queirós, 2011).

Em frações de segundo, para a estabilização do átomo, elétrons das camadas eletrónicas mais externas movem-se rapidamente para ocupar esses locais gerados, libertando uma diferença de energia existente entre 2 níveis eletrónicos envolvidos.

É, portanto, um processo expedito e que permite realizar análises por métodos não destrutivos “*in situ*” ou em laboratório, sendo necessária a moagem da amostra no caso da execução em laboratório.

2.8. SALINIDADE

A capacidade de uma corrente elétrica passar por água é diretamente proporcional à quantidade de sais dissolvidos na água, particularmente a quantidade de iões (State Water Resources Control Board Division of California, 2016). A determinação da condutividade elétrica e pH de um solo permite prever a efetividade de determinadas reações químicas. Isto torna-se especialmente importante quando se considera que a estabilização química de solos está a tornar-se algo cada vez mais comum no que toca a intervenções de estabilização.

Os solos com excesso de sais mantêm as argilas num estado floculado, de modo que os solos neste estado são normalmente considerados como tendo boas propriedades físicas, sendo a permeabilidade elevada (Abrol, Yadav & Massoud, 1988).

Quando lixiviados com água de baixo teor salino alguns solos têm tendência a dispersar os finos, resultando num decréscimo na permeabilidade à água e ar, particularmente quando os solos têm um elevado teor de argilas.

Este fenómeno pode ser facilmente explicado quando o solo tem uma elevada salinidade os iões terão tendência a associar-se à superfície das partículas de solo, impedindo que as argilas, que têm uma maior superfície específica, formem uma camada de água ao seu redor (H_2O é uma molécula polar e assim tem tendência a se associar a estas partículas carregadas).

Quando os sais são lavados pela água os sedimentos argilosos estarão livres para se associar à água do meio, levando ao seu inchamento e conseqüentemente à diminuição da permeabilidade. Esta lavagem por parte da água também pode resultar num aumento do pH do solo devido à diminuição da concentração de sais. Num contexto agrícola é corrente o controlo da salinidade de um solo através de lixiviação, ou excesso de rega (Figura 11), no entanto, numa obra de engenharia isto torna-se pouco viável devido às grandes profundidades que são atingidas.

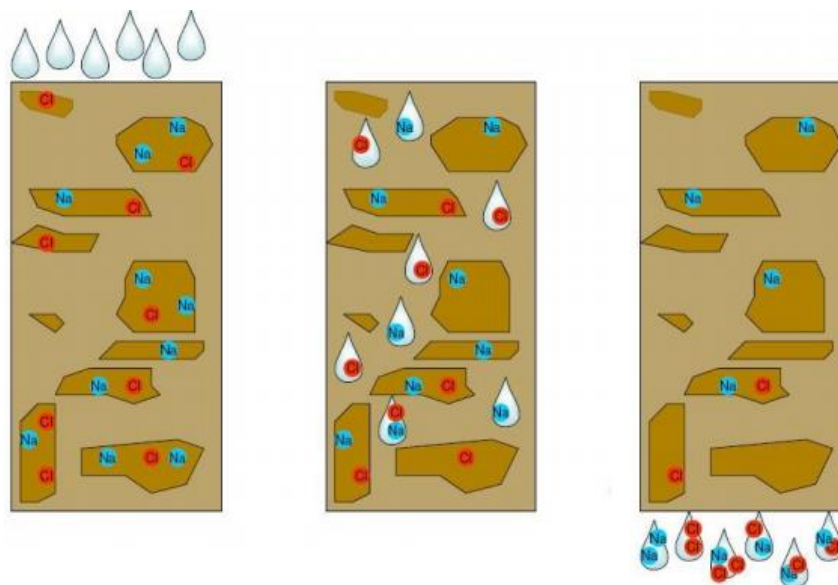


Figura 11 – Lixiviação dos sais do solo através de bombagem de água (State Water Resources Control Board Division of California, 2016).

A salinidade dos solos tem tendência a ocorrer em zonas áridas e pode ser causada por (El-Swaify, 2000):

- Ocorrência natural como produto da erosão geoquímica das rochas ou materiais encaixantes;
- Derivada diretamente por inundação, aspersão ou intrusão na água freática por parte de água marinha;
- Causada por má gestão da irrigação, particularmente quando o escoamento é ineficaz.

Os sais mais comuns na água e no solo são soluções compostas por cátions de sódio (Na^+), potássio (K^+), magnésio (Mg^{2+}) e cálcio (Ca^{2+}) juntamente com ânions de cloro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}) e bicarbonato (HCO_3^-). A unidade de leitura da condutividade é o siemens (S) por unidade de distância (S m^{-1}), no entanto os solos apresentam valores baixos, pelo que a unidade corrente passa a ser micro siemens por centímetro ($\mu\text{S.cm}^{-1}$), a 25°C.

Não há nenhuma relação direta entre a condutividade elétrica e a quantidade total de sais solúveis devido às diferentes condutividades iónicas dos diferentes sais e a influência das partículas de solo.

É normalmente calculado um valor aproximado da quantidade de sais solúveis, por multiplicar a condutividade elétrica por 0,34 (Rhoades, et al., 1989). No entanto, esta relação é de origem desconhecida e puramente empírica, portanto a sua utilização é desaconselhada.

Apesar de este ser um dos fatores que poderá ter mais influência na eficácia da aplicação de um estabilizador químico não existe praticamente documentação que explique esta relação em casos práticos.

2.9. PERMEABILIDADE

Permeabilidade, ou condutividade hidráulica, é a propriedade que representa a facilidade com a qual a água atravessa um meio poroso (Alyamani & Şen, 1993). Esta é uma das mais importantes características das formações freáticas e da engenharia geotécnica em geral, e a sua determinação pode ser aplicada em situações de assentamentos de solos saturados, estabilidade de taludes e furos de prospeção, infiltração através de barragens gravíticas, entre outros.

No entanto, a permeabilidade é uma das propriedades que apresenta mais variação, principalmente quando é testada em laboratório, já que é impossível reproduzir as macro estruturas que têm influência neste fator *in situ* e a amostragem intacta de solos granulares não é

possível. O máximo que se pode esperar é que a estrutura e a densidade das amostras sejam o mais fiéis possível às condições de campo (DeGroot, Ostendorf, & Judge, 2012).

A alternativa prática, ensaios de bombagem, é utilizada em grandes projetos, no entanto uma série destes ensaios acaba por ser dispendioso e demorado. Devido a estas limitações foram desenvolvidas várias equações empíricas para prever a permeabilidade através da distribuição das estruturas granulares (Seelheim, 1880; Hazen, 1892; Slichter, 1898; Freeze and Cherry, 1979; Carrier III, 2003; Chapuis, 2004).

A Tabela 5 indica equações empíricas apresentadas por vários investigadores, bem como o campo de aplicação e as limitações destas equações. Os termos D_5 , D_{10} , D_{20} e D_{50} dizem respeito ao tamanho do grão que corresponde a 5%, 10%, 20% e 50%, respetivamente, de material passado (mm); g é a aceleração gravítica ($\text{cm}\cdot\text{seg}^{-2}$); ν é a viscosidade ($\text{mm}^2\cdot\text{seg}^{-1}$); C_u o coeficiente de uniformidade; e o rácio de vazios; n a porosidade.

Tabela 5 – Equações empíricas para a predição da permeabilidade (adaptado de Sezer, Göktepe, Altun, 2009)

INVESTIGADOR/ ORGANIZAÇÃO	EQUAÇÃO	CAMPO DE APLICAÇÃO E LIMITAÇÕES
Kenney et al. (1984)	$k = (0,005) * D_5^2$	D = 0.074-25.4 mm e $C_u=1,04-12$.
Breyer-Kresic (1998)	$k = 6 * 10^{-2} * \frac{g}{\nu} * \log\left(\frac{500}{C_u}\right) * D_{10}^2$	$C_u=1\sim 20$, $d_{10}=0,06\sim 0,6$ mm.
Slichter (1898)	$k = \frac{g}{\nu} * n^{3.287} * D_{10}^2$	Mais apropriado para solos com $d_{10}=0,01\sim 5$ mm.
Chapuis (2004)	$k = 1.5 * D_{10}^2 * \frac{e^3}{1+e} * \frac{1+e_{max}}{e_{max}^3}$	N/A
NAVFAC (Chapuis et al. , 1989)	$k = 10^{1.291e-0.6435} * D_{10}^{0.5504-0.2987e}$	$e=0,3\sim 0,7$; $d_{10}=0,10\sim 2,0$ mm; $C_u=2\sim 12$; e $d_{10}/d_5>1,4$.
Terzaghi-Odong (2007)	$k = 0.084 * \frac{g}{\nu} * \left[\frac{n-0.13}{(1-n)^3}\right]^2 * D_{10}^2$	O valor da média selecionado de 0,084 é na verdade um coeficiente de classificação que normalmente varia entre 0,0061 e 0,00107.
USBR- (Vukovic and Soro, 1992)	$k = 0.048 * \frac{g}{\nu} * D_{20}^{0.3} * D_{10}^2$	Fornece os melhores resultados quando $C_u<5$.
Alyamani and Şen (1993)	$k = 1.5046 * (I_0 + 0.025 * (D_{50} - D_{10}))^2$	Este método é mais preciso para amostras bem graduadas;
Kozeny-Carman (1956)	$k = 0.083 * \frac{g}{\nu} * \left[\frac{n^3}{(1-n)^2}\right] * D_{10}^2$	Para $D_{10}<3$ mm. Para solos granulares o termo da inercia não é tido em conta.

A estimação de propriedades dos aquíferos como a transmissividade, coeficiente de armazenamento e condutividade hidráulica são essenciais, mas a determinação destes parâmetros é difícil devido à dificuldade de determinar as dimensões e fronteiras hidrogeológicas do aquífero. Um aspeto recorrente nestes estudos é a determinação de uma relação empírica entre a condutividade hidráulica e alguns parâmetros estatísticos como a média geométrica, moda, desvio padrão, diâmetro efetivo, entre outros.

No entanto, estes parâmetros não correspondem completamente a uma distribuição de partículas definida. Por esta razão, os métodos referidos não produzem resultados consistentes no que concerne aos valores de condutividade hidráulica (Alyamani & Şen, 1993).

Há vários fatores que influenciam a capacidade de um solo servir como condutor hidráulico (Feitosa & Filho, 2000):

- Quanto maior o tamanho médio dos grãos de solo maior a permeabilidade (porque os vazios são maiores);
- Quanto maior o desvio padrão do diâmetro das partículas, menor a permeabilidade (o aumento do desvio padrão indica maior variação dos tamanhos dos grãos, com as partículas menores a ocupar os espaços entre as maiores)

Amostras com um tamanho de grão dominante apresentam maior permeabilidade. A Tabela 6 mostra alguns exemplos de condutividade hidráulica associada a determinados tipos de sedimentos não consolidados.

Tabela 6 – Faixa de valores de condutividade hidráulica para vários materiais não consolidados (Fetter, 1988).

MATERIAL	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (cm/s)
Argila	$10^{-9} - 10^{-6}$
Silte; Silte arenoso	$10^{-6} - 10^{-4}$
Areia argilosa	$10^{-6} - 10^{-4}$
Areia siltosa; Areia fina	$10^{-5} - 10^{-3}$
Areia bem graduada	$10^{-3} - 10^{-1}$
Cascalho	$10^{-2} - 10^{-1}$

2.10. COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

A mineralogia dos solos é algo que é determinado de uma forma rotineira, devido à sua forte influência no comportamento de solos e a sua relevância e utilização em sistemas de classificação de solos.

A difração de raio X é uma técnica que permite obter uma informação detalhada sobre a estrutura atômica cristalina das substâncias e é uma ferramenta poderosa no que toca à identificação de minerais em rochas e solos.

A maioria da fração argilosa de muitos solos é cristalina, mas as partículas de argila são demasiado pequenas para que métodos de cristalografia ótica possam ser aplicados. Portanto, a difração de raio X tem sido um pilar na identificação destes elementos em solos. No entanto, a sua utilidade também se estende a frações mais grosseiras (Harris & White, 2008).

Os minerais das argilas são compostos essencialmente por uma combinação de sílica (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) ou hidróxido de magnésio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), sendo que é comum a presença de ferro (em substituição de alumínio e magnésio em medidas variáveis), potássio, sódio e cálcio. A concentração de sílica é que determina o tipo de um determinado mineral.

Há nove grupos das argilas: (1) caulino-serpentina (caulinite, halosite, lizardite, crisotile), (2) talco-pirofilite, (3) mica (ilite, glauconite, celadonite), (4) vermiculite, (5) esmectite (montmorilonite, nontronite, saponite), (6) clorite (sudoite, clinocloro, chamosite), (7) paligorsquite-sepiolite, (8) minerais de argila interstratificados (e.g. rectorite, corrensite, tosudite) e (9) imogolite-alofana (Encyclopaedia Britannica, 2016).

Todos estes minerais são silicatos com estrutura estratificada (filissilicatos), excepto no grupo Paligorsquite -Sepiolite, no qual os silicatos formam cadeias (Carroll, 1970). O principal elemento que distingue estes grupos é a sua estrutura química. Não estão documentadas as diferenças no comportamento macroscópico dos diferentes grupos de argilas.

Segundo Skempton, (1953) a atividade coloidal (A_C) é designada como a razão entre o índice de plasticidade e a percentagem da fração argilosa de um solo. Quanto maior for o índice de plasticidade mais pronunciadas serão as propriedades da argila.

$$A_C = \frac{IP}{\% \text{ de partículas } < 0.002mm} \quad (3)$$

Depois de serem projetados os valores da atividade das argilas é possível enquadrar os solos de acordo com os minerais argilosos, na medida em que a atividade dos solos é resultante da atividade dos minerais que o constituem (Tabela 7).

Tabela 7 – Minerais das argilas, quartzo e calcite de acordo com os valores da sua atividade (Salas & Alpañes, 1971).

MINERAL	AC
Quartzo	0,0
Calcite	1,8
Mica (moscovite)	0,23
Caulinite	0,01 – 0,41
Illite	0,23 – 0,80
Paligorsquite	0,57 – 1.23
Montemorilonite (Ca, Mg, K, NH ₄)	0,32 – 3,09
Montemorilonite (Na, Li)	1,12 – 11,5

A Tabela 8 inclui uma classificação dos minerais de argila quanto à sua atividade. Do conjunto das Tabelas 7 e 8 pode concluir-se que a montemorilonite e calcite são muito ativas, a paligorsquite é normal e a caulinite e paligorsquite são pouco ativas.

Tabela 8 – Classificação dos minerais de argila quanto à sua atividade (Fernandes, 2011).

ARGILA	AC
Pouco ativa	< 0,75
Normal	0,74 – 1,25
Muito ativa	> 1,25

2.11. POTENCIAL ELÉTRICO ZETA

A análise do potencial elétrico zeta das partículas é uma técnica que determina a carga da superfície de nanopartículas em soluções coloidais. Estas partículas têm uma carga que atrai uma camada fina de iões de carga oposta para a sua superfície. Esta camada dupla de iões “viaja” com a partícula à medida que se difunde pela solução (Figura 12). O potencial elétrico na zona de fronteira é conhecido como potencial Zeta das partículas e tem valores que normalmente variam entre -100 mV até +100 mV.

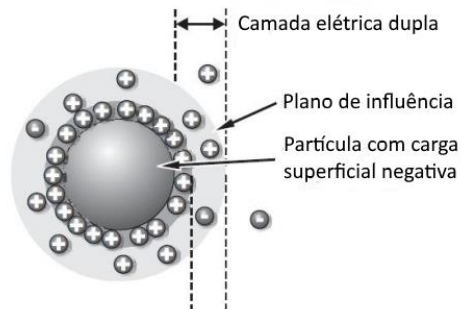


Figura 12 – Camada elétrica dupla em torno da partícula (adaptado de nanoComposix, 2012).

A variação do potencial Zeta é indicativo da estabilidade coloidal. Partículas com potencial Zeta maior ou menor do que o intervalo -25 mV a $+25\text{ mV}$ apresentam um maior grau de estabilidade. Dispersões com um potencial Zeta maior terão uma maior tendência a não se agregar (nanoComposix, 2012).

É possível alterar a carga de uma partícula artificialmente, desta maneira impedindo a sua agregação. Isto pode ser alcançado através de métodos eletrostáticos por adsorção de polímeros ou pela introdução de uma carga na superfície da partícula (e.g. modificação do pH). Se a força repulsiva exceder a força atrativa então é alcançada a estabilidade do sistema, portanto, se o potencial Zeta de todas as partículas for elevado (positiva ou negativamente) então as partículas terão tendência a se repelir e não se agregarão. Mas se o potencial Zeta for baixo haverá uma repulsão insuficiente para impedir o seu agregamento e conseqüente floculação (Larsson, Hill & Duffy, 2012).

As propriedades físicas de coloides e suspensões dependem amplamente da natureza da interação partícula-líquido. O comportamento de dispersões aquosas é especialmente sensível à estrutura iônica e elétrica dessa interface. A produção e estabilidade (neste contexto, estabilidade refere-se à resistência da dispersão em se alterar com o tempo, aplicado a solos significa que as suspensões com partículas finas resistem mais tempo à precipitação) de coloides e suspensões dependem da chamada 'dupla camada elétrica' que caracteriza esta interface.

As argilas consistem principalmente em partículas lamelares que, em contacto com a água, têm normalmente cargas negativas no seu centro e cargas positivas nas suas arestas. As propriedades físicas de sistemas que envolvam esta interação entre argilas-água (como a sedimentação, filtração, expansão, viscosidade, limite de elasticidade e força estrutural) são extremamente sensíveis à natureza da camada dupla das partículas e à tendência de as partículas e a água se agregarem.

Medições do potencial zeta provêm informação particularmente relevante no que toca a ensaios de corte e consolidação (Brookhaven Instruments Corporation, 2016).

MATERIAL DE ESTUDO

3. MATERIAL DE ESTUDO

Para a realização dos ensaios foram utilizados cinco solos com várias características e origens:

- Um solo avermelhado xistoso de Portugal (PT_x) com elevada quantidade de partículas finas (Figura 13);



Figura 13 - Solo PT_x.

- Um solo claro granítico de Portugal (PT_g) com uma grande quantidade de material granítico decomposto em forma de esferas de diferentes diâmetros (Figura 14);



Figura 14 - Solo PT_g.

- Um solo castanho acinzentado da Índia (IN₁), predominantemente constituído por uma areia fina (Figura 15);



Figura 15 - Solo IN₁.

- Um solo castanho da Índia (IN₂) predominantemente constituído por material fino (Figura 16);



Figura 16 - Solo IN₂.

- Um solo bege da Malásia (ML_k) de granulometria extensa (Figura 17).

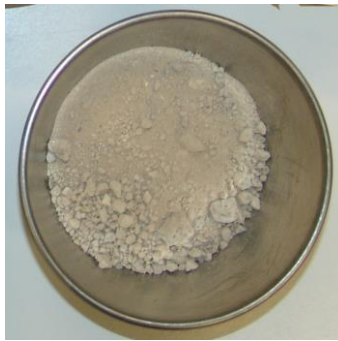


Figura 17 - Solo ML_k.

Os solos da Índia e Malásia foram obtidos diretamente de obras de estabilização de solos, pelo que, ainda tinham humidade do meio em que se encontravam. Ao contrário deles os portugueses foram obtidos do armazém de um laboratório, pelo que estavam praticamente secos.

Aliás o solo PT_x encontrava-se petrificado (Figura 18), pelo que foi necessário dissolvê-lo em água e secá-lo para que fosse possível desagrega-lo para utilizar nos ensaios. Não é possível determinar se este solo se encontrava assim devido às condições em que estava armazenado ou se já estava neste estado *in situ*. Todas as amostras utilizadas são de solos remexidos, pelo que os ensaios realizados têm este aspeto em conta.



Figura 18 – Solo PT_x petrificado.

Apesar de o solo PT_G apresentar esferas graníticas estas estavam num estado de alteração bastante avançado, pelo que durante o processo de preparação das amostras através da secagem e desagregação de torrões, estas esferas desfaziam-se.

A obtenção dos solos estrangeiros trouxe algumas complicações - uma delas foi não ter sido possível determinar o contexto geológico em que estes se inseriam, que em muito beneficiaria este trabalho. Quanto aos solos portugueses, isto também não pôde ser determinado, uma vez que os solos usados estavam armazenados em laboratório já há muito tempo e a sua proveniência exata é desconhecida.

Aquando da receção de cada um dos solos realizou-se imediatamente a determinação do teor de água de cada um. De seguida, como preparação para os ensaios, secaram-se as amostras e desagregaram-se quaisquer torrões de modo a que os solos ficassem o mais uniformizados possível.

PROCOLOS

4. PROTOCOLOS

4.1. TEOR DE ÁGUA

O ensaio do teor de água tem como objetivo a determinação percentual da massa de água presente num solo. Este ensaio tem de ser efetuado o mais prontamente possível aquando da receção das amostras de modo a evitar a secagem das mesmas. Este procedimento foi baseado na norma utilizada para a determinação do teor de água, a norma portuguesa NP-84 1965.

APARELHOS E UTENSÍLIOS

Os aparelhos e utensílios utilizados foram os seguintes (Figura 19):



Figura 19 – Principais aparelhos e utensílios utilizados para o ensaio do teor de água.

- Recipiente para o provete de boca larga circular com tampa resistente à humidade e calor.
- Balança para pesagens com limites de erro de $\pm 0,1$ g.
- Estufa de secagem, capaz de manter 105-110 °C.
- Exsicador de 20 a 25 cm de diâmetro, contendo sílica-gel.

PROCEDIMENTO

1. Desagrega-se o provete, introduz-se no recipiente e fecha-se. Esta operação deve de ser realizada o mais rapidamente possível de modo a evitar perdas de humidade.
2. Pesa-se o conjunto, introduz-se na estufa e seca-se a 105-110 °C até que a diferença entre pesagens, efetuadas a intervalos de 4 horas, não seja superior a 0,1% da massa inicial do provete.

4.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAÇÃO HÚMIDA

O ensaio de análise granulométrica tem como objetivo a determinação da distribuição de calibres da fração granulométrica de um solo. Este ensaio apenas é aplicável a partículas maiores do que 0,074 mm.

O solo passa por uma série de peneiros de malha quadrada com abertura cada vez menor, sendo que o material retido em cada um dos peneiros é de dimensão maior do que a abertura da malha deste e menor do que a abertura da malha do anterior. O material retido em cada um dos peneiros é pesado numa balança e é calculada a distribuição em percentagem ponderal das partículas. O resultado é representado por um gráfico em escala semi-logarítmica com o diâmetro equivalente das partículas no eixo X e a percentagem de material retido no eixo Y. Este procedimento foi baseado na norma em vigor para a determinação da análise granulométrica por peneiração húmida, a especificação desenvolvida pelo LNEC E 239-1970.

APARELHOS E UTENSÍLIOS

Os aparelhos e utensílios utilizados foram os seguintes (Figura 20):



Figura 20 – Principais aparelhos e utensílios utilizados para o ensaio de análise granulométrica por peneiração húmida.

- Série de peneiros ASTM de malha quadrada com as seguintes aberturas: 76,1 mm, 50,8 mm, 38,1 mm, 25,4 mm, 19,0 mm, 9,51 mm, 4,76 mm (n.º 4), 2,00 mm (n.º 10), 0,841mm (n.º 20), 0,420 mm (n.º 40), 0,250 mm (n.º 60), 0,105 mm (n.º 140) e 0,074 mm (n.º 200).
- Agitador de peneiros.
- Balança para pesagens com limites de erro de $\pm 0,1$ g.
- Estufa de secagem, capaz de manter 105-110 °C.
- Almofariz e pilão revestido de borracha, ou dispositivo mecânico capaz de produzir a desagregação dos torrões, sem todavia reduzir o tamanho Individual das partículas.
- Repartidores.
- Solução de hexametáfosfato de sódio comercial (contendo por litro 33 g de hexametáfosfato e 7 g de carbonato de sódio).
- Cápsulas de porcelana com cerca de 15 cm de diâmetro.
- Copo de precipitação de 500 cm³.
- Frasco de lavagem por esguicho.

PROCEDIMENTO

FRAÇÃO RETIDA NO PENEIRO DE 2,00mm (N.º 10)

1. Através de peneiros de malha de abertura superior a 2,00 mm, i.e., 76,1 mm, 50,8 mm, 38,1 mm, 25,4 mm, 19,0 mm, 9,51 mm, 4,76 mm (n.º 4) e 2,00 mm (n.º 10); peneira-se o material grosso seco na estufa, de massa m_{10} começando pelo peneiro de malha mais larga. A peneiração deve ser executada realizando-se movimentos horizontais de translação e rotação, de forma a manter o material em movimento contínuo no fundo dos peneiros; a peneiração deve prolongar-se até que, em qualquer peneiro, não passe, durante 1 min, mais de 1 % do material retido nesse peneiro. Neste caso foi utilizado um agitador tipo vibratório.
2. As massas das frações retidas são determinadas em cada peneiro com a balança.

FRAÇÃO PASSADA NO PENEIRO DE 2,00 mm (N.º 10)

1. Tomam-se cerca de 100g (solos arenosos) ou 50 g (solos siltosos ou argilosos) passado no peneiro de 2 mm (nº 10), pesam-se na balança e regista-se a massa m_a .

2. Coloca-se o solo no copo de precipitação, juntam-se 250 cm³ de água em que se dissolveu previamente 0,5 g de hexametáfosfato de sódio comercial, agita-se bem com uma vareta de vidro e deixa-se repousar durante pelo menos 1 h, agitando de vez em quando.
3. Transfere-se a suspensão para um peneiro de 0,074 mm (n.º 200), onde é lavada por meio dum jato de água destilada. Deve haver cuidado em transferir todos os resíduos da suspensão aderentes ao copo.
4. O material retido no peneiro é transferido para uma cápsula e seca-se na estufa a 105-110 °C, até massa constante.
5. Peneira-se em seguida pelos peneiros de 0,841 mm (n.º 20), 0,420 mm (n.º 40), 0,250 mm (n.º 60), 0,105 mm (n.º 140) e 0,074 mm (n.º 200), segundo a técnica descrita anteriormente.
6. Determinam-se as massas das frações retidas em cada peneiro, utilizando a balança.

4.3. ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO

O ensaio de sedimentação tem como objetivo a determinação da distribuição de calibres abaixo dos 0,074 mm da fração granulométrica de um solo, sendo portanto complementar à análise granulométrica. É utilizada a fração de finos que no ensaio granulométrico por peneiração húmida é descartada. O resultado é associado ao ensaio granulométrico e representado por um gráfico em escala semilogarítmica com o diâmetro equivalente das partículas no eixo X e a percentagem de material retido no eixo Y. Este procedimento foi baseado na norma em vigor para o ensaio de sedimentação, a especificação desenvolvida pelo LNEC E 196-1966.

APARELHOS E UTENSÍLIOS

Os aparelhos e utensílios utilizados foram os seguintes (Figura 21):



Figura 21 – Principais aparelhos e utensílios utilizados para o ensaio de sedimentação.

- Água destilada.
- Balança para pesagens com limites de erro de $\pm 0,1$ g.
- Densímetro graduado em intervalos de densidade de 0,001.
- Termómetro graduado de 0 a 50 °C, com erro inferior a $\pm 0,5$ °C.
- Proveta graduada de 1000 cm³.
- Cronómetro.
- Régua graduada em milímetros.
- Proveta graduada de 100 cm³.
- Papel de filtro.
- Vareta de vidro.
- Frasco de lavagem por esguicho.

PROCEDIMENTO

1. Utilizando a fração descartada durante o ensaio granulométrico enche-se a proveta e agita-se vigorosamente. De seguida assim que se poussa a proveta ativa-se o cronómetro.
2. Introduce-se o densímetro na suspensão até à profundidade ligeiramente acima da posição de flutuação e deixa-se flutuar livremente.
3. Lê-se o valor ao fim de 1 min, 2 min e 5 min (Figura 22).

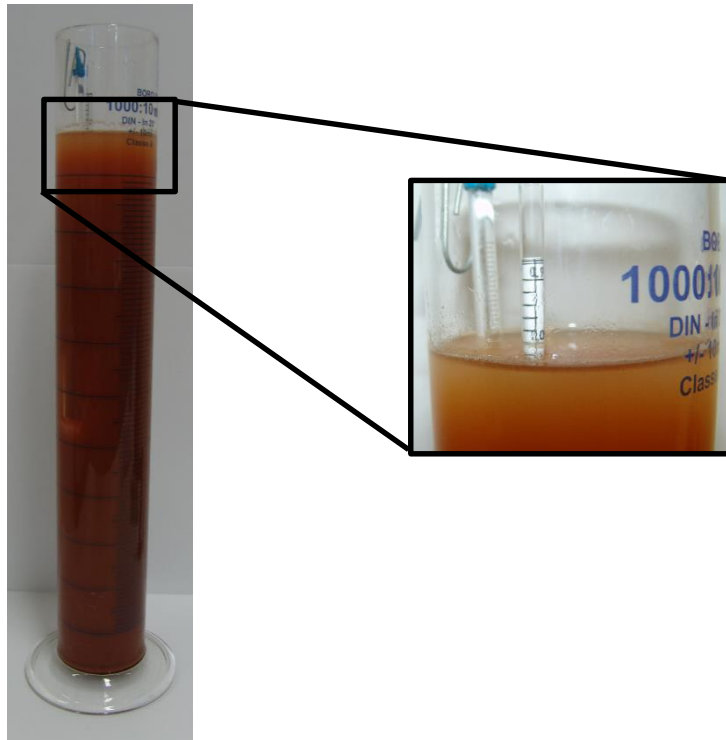


Figura 22 – Montagem do ensaio de sedimentação e pormenor da leitura do densímetro.

4. Remove-se o densímetro lentamente, lava-se com água destilada e conserva-se numa proveta com água destilada à mesma temperatura da solução.
5. Introduce-se o densímetro na suspensão para leituras aos 15 min, 30 min, 60 min, 250 min, 1440 min (24 horas) e 2880 min (48 horas). Regista-se a temperatura da suspensão após cada leitura. No intervalo das leituras a proveta deve de estar coberta com papel de filtro.

4.4. ENSAIOS DE CONSISTÊNCIA

Os limites de consistência (liquidez e plasticidade) permitem antecipar alguns aspetos de comportamento mecânico do solo. Estes ensaios são somente aplicáveis a solos com cerca de 30 %, ou mais, em massa, de partículas de dimensões inferiores a 0,05 mm. Ficam, portanto, excluídos os solos predominantemente arenosos, para os quais o ensaio, mesmo quando possível, perde o seu significado.

O limite de liquidez (W_L) de uma amostra de solo representa o teor em água correspondente a 25 pancadas, obtido por interpolação numa curva que relaciona o teor em água de cada um de 4 provetes da amostra com o número de pancadas para o qual os bordos inferiores de um sulco aberto, num provete, se unem numa extensão de 1 cm, quando o ensaio é feito na concha de Casagrande (Figura 23).

O limite de plasticidade (W_p) corresponde à média dos teores em água de 4 provetes da amostra a ensaiar, cada um dos quais é o maior teor em água com que rompe cada provete ao pretender-se transformá-lo num filamento cilíndrico com cerca de 3 mm de diâmetro, por rolagem entre a palma da mão e uma placa do vidro (Figura 23).

Este procedimento foi baseado na norma em vigor para os ensaios de consistência, a norma portuguesa NP-143 1969.

APARELHOS E UTENSÍLIOS

Os aparelhos e utensílios utilizados foram os seguintes (Figura 23):



Figura 23 – Principais aparelhos e utensílios utilizados para os ensaios de consistência.

- Concha de Casagrande - Aparelho essencialmente constituído por uma calote esférica de latão, com 2 mm de espessura, e por um dispositivo mecânico que permite fazer levantar a calote que em seguida cai, de altura regulável, sobre uma base de madeira, de borracha dura ou outro material de características idênticas.
- Riscador - Peça metálica, por exemplo latão, com uma das extremidades em perfil triangular com o vértice truncado numa largura de 2mm, e a outra com o calibre de 10 mm, destinado a permitir regular a altura de queda da concha de Casagrande.
- Almofariz com mão de borracha ou de outro material macio.
- Peneiro de malha quadrada de 420 μm (peneiro n.º 40 da ASTM).

- Cápsula de porcelana ou recipiente de vidro com cerca de 10 cm de diâmetro.
- Espátula para preparar a pasta de solo com água destilada.
- Placa de vidro sobre o qual se possa rolar o provete.
- Aparelhos e utensílios necessários à determinação do teor em água de um provete de solo (veja-se a Norma NP-84).

PROCEDIMENTO

PREPARAÇÃO DO PROVETE

1. Tomam-se 500 g da amostra a ensaiar e passa-se o material através do peneiro 420 μm (n.º 40 da série ASTM).
2. Do material que passar através do peneiro, tomam-se 100 g que se amassam à espátula com água destilada até se formar uma pasta homogénea e consistente. De cada vez que se adiciona nova porção de água, a amassadura deve durar, pelo menos, 5 minutos.

LIMITE DE LIQUIDEZ

1. Toma-se uma porção de pasta preparada como se indicou que se coloca na concha de modo que se obtenha uma camada, com comprimento de cerca de metade da concha de Casagrande, com a espessura máxima de 1 cm e com a superfície nivelada.
2. Faz-se um sulco que deverá ser obtido deslocando o riscador, segundo o diâmetro da concha, e no sentido normal ao eixo.
3. Aciona-se, em seguida, a manivela ou o motor elétrico, à razão de 2 voltas por segundo, até que as duas porções do provete, devido as pancadas da concha sobre a base, entrem em contacto pela parte inferior do sulco numa extensão de cerca de 1 cm, e anota-se o numero de pancadas correspondente (Figura 24).



Figura 24 – Montagem do ensaio de limite de plasticidade antes e após as pancadas da concha de Casagrande.

4. Retiram-se, com a ponta da espátula, cerca de 10 g do provete da zona do sulco em que se deu a união, e procede-se à determinação do seu teor em água (veja-se a Norma NP-84).
5. Ensaiado o primeiro provete, serão sucessivamente preparados mais três por adição de novas quantidades de água destilada à pasta anteriormente obtida, de forma que a torne mais fluida. Os teores em água dos 4 provetes devem ser escolhidos de modo 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, em outros dois, acima.

LIMITE DE PLASTICIDADE

1. Rola-se um dos provetes da mistura obtida entre a palma da mão e a placa de vidro, com pressão suficiente para a transformar num filamento cilíndrico.
2. Quando o diâmetro do filamento atinge cerca de 3 mm, volta-se a formar a esfera e a rolá-la de novo, e continuam-se estas operações até que devido a progressiva secagem do provete, se dê a rotura do filamento quando o seu diâmetro atinge cerca de 3 mm (Figura 25).

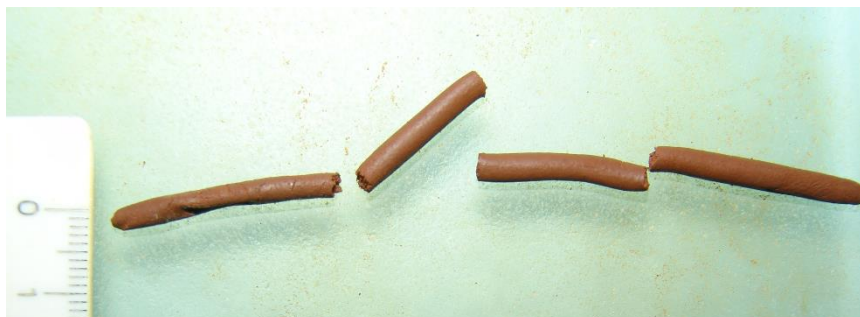


Figura 25 – Filamento cilíndrico utilizado para a determinação do limite de plasticidade.

3. Aglomeram-se os filamentos obtidos e determina-se o seu teor em água (veja-se a Norma NP-84).
4. Repetem-se sobre cada um dos restantes três provetes as operações indicadas.

4.5. EQUIVALENTE DE AREIA

O equivalente de areia permite avaliar a quantidade de elementos finos numa amostra de solo, através da relação volumétrica entre os elementos arenosos e a totalidade dos elementos, arenosos e finos.

Este ensaio realiza-se sobre a fração de solo passada pelo peneiro 4,76 mm (nº4) e aplica-se a solos pouco plásticos (aqueles em que os limites de consistência não são possíveis de determinar).

Este procedimento foi baseado na norma em vigor para a determinação do equivalente de areia, a especificação desenvolvida pelo LNEC E 199-1967.

APARELHOS, UTENSÍLIOS E REAGENTES

Os aparelhos e utensílios utilizados foram os seguintes (Figura 26):



Figura 26 – Principais aparelhos e utensílios utilizados para o ensaio de equivalente de areia.

- Solução concentrada, contendo por litro: 111 ± 1 g de cloreto de cálcio cristalizado anidro (produto puro); 480 ± 5 g de glicerina a 99 % de glicerol (produto farmacêutico); 12 a 13 g de formaldeído a 40% em volume (produto farmacêutico); água destilada até perfazer 1000 cm^3 .
- Solução diluída, preparada a partir de uma toma de $125 \pm 1 \text{ cm}^3$ de solução concentrada, adicionando-se-lhe água destilada até perfazer $5 \pm 0,05 \text{ dm}^3$, e agitando vigorosamente.
- Proveta cilíndrica transparente, de vidro ou plástico, com diâmetro exterior de $40 \pm 0,5$ mm, diâmetro interior de $32 \pm 0,5$ mm e altura de $430 \pm 0,25$ mm. Na proveta existem duas referências gravadas às alturas de $100 \pm 0,25$ mm e $380 \pm 0,25$ mm, medidas partir do fundo.
- Rolha de borracha para fechar a proveta.
- Tubo de lavagem, constituído por um tubo rígido (aço inoxidável ou latão) com $6 \pm 0,5$ mm de diâmetro exterior e $3 \pm 0,2$ mm de diâmetro interior, munido de uma torneira na parte superior e de uma ponta roscada, em metal inoxidável, com forma de cunha. Cada face da cunha tem um furo com $1 \pm 0,1$ mm de diâmetro.

- Recipiente transparente, de vidro ou plástico, com a capacidade de 5 dm³ aproximadamente, munido de um sistema de sifão, O recipiente é colocado durante o ensaio, com o fundo a cerca de 1 m acima do tampo da mesa de trabalho.
- Tubo de borracha ou plástico, com cerca de 1,50 m de comprimento e 5 mm de diâmetro interior, destinado a fazer a ligação do tubo de lavagem ao sifão.
- Pistão de metal inoxidável, devidamente tarado, constituído por: uma haste de altura superior a 430 mm; uma base de $25 \pm 0,25$ mm de diâmetro, com face inferior plana, lisa e perpendicular ao eixo da haste, e possuindo 3 parafusos laterais para centragem, com pequena folga, do pistão na proveta; uma peça guia metálica, de $10 \pm 0,1$ mm de espessura, adaptável à boca da proveta, munida de um parafuso para fixação da haste do pistão, e permitindo guiar esta última, ao mesmo tempo que serve de referência em relação à parte introduzida na proveta; um peso colocado na extremidade superior da haste para completar a tara de 1000 ± 5 g do pistão (excluída a peça metálica com o parafuso de fixação da haste).
- Agitador mecânico, manual ou elétrico, capaz de imprimir à proveta um movimento horizontal, retilíneo, periódico e sinusoidal de 20 ± 1 cm de amplitude com um período de 1/3 de segundo.
- Peneiro ASTM de malha quadrada de 4,76 mm (n.º 4) de abertura, com fundo e tampa.
- Repartidor com 5 mm de abertura.
- Funil.
- Recipiente com a capacidade de 200 cm³.
- Balança para pesagens, com limites de erro de ± 1 g.
- Cronómetro.
- Régua de 500 mm, graduada em milímetros.
- Utensílios diversos: pincel de pelo macio para limpeza das provetas, espátula, colher, tabuleiros e pilão para desfazer torrões.

PREPARAÇÃO DO PROVETE

1. Pesa-se uma quantidade de solo tal que permita obter cerca de 500 g de solo passado no peneiro de 4,76 mm (n.º 4).
2. Se os elementos retidos no peneiro de 4,76 mm (n.º 4) ainda estiverem envolvidos por uma camada de elementos finos que não se soltaram durante a peneiração, os elementos retidos deverão ser lavados e os finos recuperados e adicionados ao material já passado. Misturam-se cuidadosamente as duas partes com uma espátula e esquadrela-se se for necessário, com o material já mais seco.
3. Tomam-se duas porções de solo que correspondam, cada uma, a 120 g de solo seco.

PROCEDIMENTO

1. Determina-se a constante k do aparelho, introduzindo-se o pistão na proveta vazia e verificando, com aproximação ao milímetro, a distância entre a face superior da peça guia e a face inferior do peso.
2. Transfere-se a solução diluída do recipiente transparente, colocado com o fundo à altura de 1 m em relação ao tampo da mesa de trabalho, para a proveta cilíndrica até atingir o traço de referência inferior.
3. Introduce-se, com o auxílio do funil, na proveta colocada verticalmente, o solo preparado.
4. Bate-se fortemente e por várias vezes a base da proveta sobre a palma da mão, para desalojar as bolhas de ar e facilitar a molhagem do provete. Deixa-se repousar durante 10 minutos.
5. Depois de convenientemente fechada com uma rolha de borracha, fixa-se a proveta no agitador e submete-se a uma agitação de 90 ± 1 ciclos, em 30 ± 1 s.
6. Retira-se a proveta da máquina, coloca-se na posição vertical, destapa-se e desce-se o tubo de lavagem, lavando-se de cima para baixo as paredes da proveta. Introduce-se o tubo até ao fundo da proveta, diversas vezes, fazendo subir os elementos argilosos, com movimento contínuo e lento de vaivém. Este movimento deverá ser acompanhado por um rodar suave do tubo de lavagem, com uma mão, e da proveta em sentido contrário, com a outra mão.
7. Quando o líquido atingir, na proveta, o traço de referência superior, retira-se lentamente o tubo de lavagem, de modo que aquele nível se mantenha sem parar o escoamento
8. Deixa-se repousar sem perturbações durante $20 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$.

9. Determina-se a altura h_1 do nível superior do floculado e, se possível, a altura h'_2 do nível superior da parte sedimentada, em relação ao fundo da proveta, lidas com aproximação ao milímetro.
10. Desce-se lentamente o pistão na proveta, até repousar sobre a parte sedimentada. Durante esta operação, a peça metálica destinada a guiar o pistão deve estar apoiada na boca da proveta; quando o pistão atingir a parte sedimentada, aperta-se o parafuso da peça guia de encontro à haste.
11. Determina-se, com a aproximação do milímetro, a altura h_3 , entre a face superior da peça guia e a face inferior do peso do pistão. Determina-se a altura do sedimento h_2 , subtraindo de h_3 , a constante do aparelho k (Figura 27).

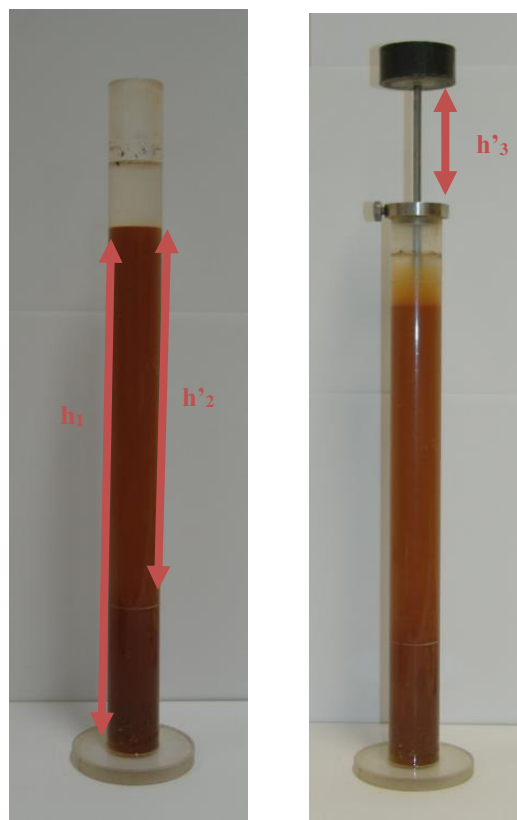


Figura 27 – Montagem do ensaio de equivalente de areia

4.6. MASSA ESPECÍFICA

A massa específica é definida como o peso por unidade de volume. Na maior parte dos casos de mecânica dos solos é suficiente o conhecimento da densidade das partículas do solo com dimensão inferior a 4,76 mm.

Este procedimento foi baseado na norma utilizada para determinação da massa específica, a norma portuguesa NP-83 1965.

APARELHOS E UTENSÍLIOS

Os aparelhos e utensílios utilizados foram os seguintes (Figura 28):



Figura 28 – Principais aparelhos e utensílios utilizados para o ensaio de massa específica.

- Picnómetro de, pelo menos, 100 cm³ ou de cerca de 500 cm³.
- Peneiro ASTM de malha quadrada de 4,76 mm (n.º 4) de abertura, com fundo e tampa.
- Termómetro graduado de 0 a 50 °C com erro inferior a ± 0,5 °C.
- Cápsula de porcelana.
- Balança para pesagens, com limites de erro de ± 0,1 g.
- Estufa de secagem, capaz de manter 105-110 °C.
- Exsicador de 20 a 25 cm de diâmetro, contendo sílica-gel.

PROCEDIMENTO

1. É tomada uma porção de 25 g de solo seco constituído por partículas que passam no peneiro com 4,76 mm de abertura.
2. Transfere-se o provete para o picnómetro, que se enche até cerca de três quartos da capacidade com água destilada, isenta de ar, e deixa-se embeber durante pelo menos 12 horas. O ar remanescente é extraído utilizando um exsicador de vácuo. Deixa-se o picnómetro em repouso até que o seu conteúdo atinja a temperatura ambiente.
3. Acrescenta-se água destilada até ao traço de referência, enxuga-se cuidadosamente e pesa-se (Figura 29).



Figura 29 – Montagem do ensaio de massa específica.

4. Determina-se a temperatura do conteúdo do picnómetro.

4.7. AZUL DE METILENO

O ensaio de azul-de-metileno tem como objetivo a determinação da quantidade de materiais finos num solo. São adicionados sucessivamente incrementos de uma solução de azul de metileno a uma suspensão em água do provete de ensaio. A adsorção da solução corante pelo provete após a adição de cada incremento da solução é verificada pela realização de um ensaio de manchas em papel de filtro de modo a detetar a presença de corante livre.

Quando a presença de corante livre é confirmada, o valor de azul-de-metileno é calculado e expresso em gramas de corante adsorvido por quilograma da fração granulométrica ensaiada. Não está em vigor nenhuma norma para o ensaio de azul de metileno para solos em Portugal, portanto este procedimento foi baseado na norma francesa NF P 94-068.

APARELHOS E UTENSÍLIOS

Os aparelhos e utensílios utilizados foram os seguintes (Figura 30):

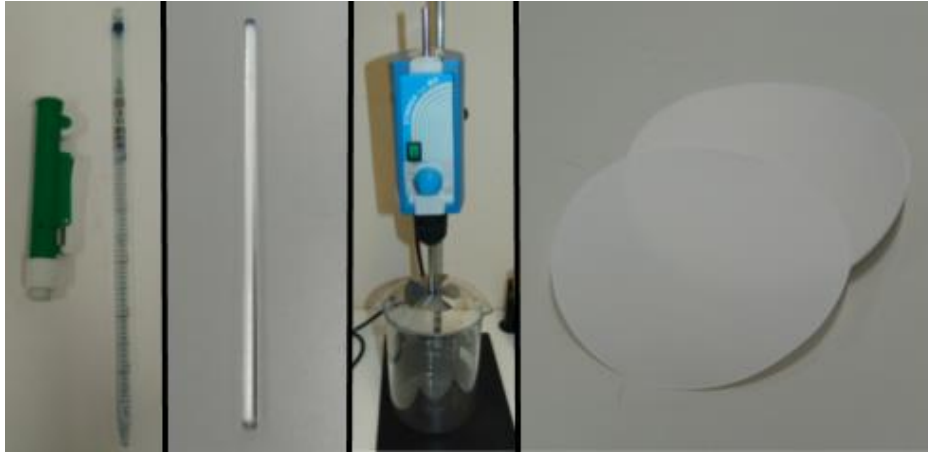


Figura 30 – Principais aparelhos e utensílios utilizados para o ensaio de azul de metileno.

- Solução corante de 1 g de azul-de-metileno para 100 ml de água.
- Pipeta graduada de 10 ml.
- Papel de filtro, quantitativo e isento de cinzas ($< 0,010\%$); 95 g/m^2 ; espessura $0,20\text{ mm}$; velocidade de filtragem 75 s ; tamanho de poros $8\text{ }\mu\text{m}$.
- Vara de vidro, de comprimento 300 mm ; diâmetro 8 mm .
- Agitador de ventoinha, com velocidade de rotação variável controlável até (600 ± 60) rotações/minuto com três ou mais lâminas de ventoinha de (75 ± 10) mm de diâmetro.
- Balança, com a exactidão de $\pm 0,1\%$ da massa a pesar.
- Cronómetro, com a exactidão de 1 s .
- Peneiro de ensaio, com abertura de 2 mm e, se necessário, um peneiro de resguardo.
- Goblé de vidro com capacidade de cerca de 1000 cm^3 .
- Estufa de secagem, capaz de manter $105\text{-}110\text{ }^\circ\text{C}$.
- Termómetro, com exactidão de $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$.
- Espátula.

PROCEDIMENTO

1. São preparados, e apontadas as massas m_{h1} de dois provetes de:
 - $30 - 60\text{ g}$ para solos argilosos;
 - $> 60\text{ g}$ para solos arenosos.

2. Coloca-se (500 ± 5) ml de água destilada no goblé e adiciona-se o provete de ensaio seco, mexendo bem com a espátula.
3. Regula-se o agitador para uma velocidade de 700 rotações/minuto e posiciona-se a ventoinha cerca de 5 mm acima da base do copo.
4. Liga-se o agitador e inicia-se o cronómetro, agitando o conteúdo do copo durante 5 min.
5. Injeta-se uma dose de 5 ml de solução corante de azul-de-metileno no goblé. Agita-se a (400 ± 40) rotações/minuto durante pelo menos 1 min \pm 10 s e efetua-se um ensaio da mancha sobre o papel de filtro. O ensaio da mancha consiste em retirar uma gota de suspensão com a ajuda da vara e depositá-la sobre o papel de filtro. A mancha que se forma é composta por uma zona central de material depositado, geralmente de cor azul escura, rodeada por uma zona húmida sem cor. O ensaio é considerado positivo se, na zona húmida, uma auréola persistente azul clara de cerca de 1 mm de espessura se formar à volta do depósito central (Figura 31).

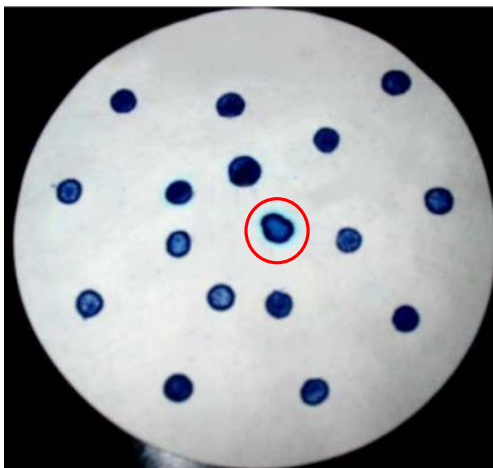


Figura 31 – Auréola azul permanente no ensaio de Azul de metileno.

6. Se auréola não aparecer, adiciona-se mais 5 ml de solução corante, continua-se a agitação durante 1 min \pm 10 s, procede-se a tantos ensaios da mancha quantos necessários até que apareça a auréola.
7. Quando esta etapa for atingida, continuar a agitação sem mais adições de solução corante, efetuando ensaios da mancha em intervalos de 1 min \pm 10 s, durante 5 min.
8. Se a auréola desaparecer antes dos 5 minutos adiciona-se mais 2 ml de solução corante, continua-se a agitação durante 1 min \pm 10 s, procede-se a tantos ensaios da mancha quantos necessários até que a auréola persista durante 5 min.

4.8. ANÁLISE QUÍMICA QUANTITATIVA POR ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X EQUIPAMENTO PORTÁTIL

A análise por fluorescência de Raios X (FRX) é um processo quantitativo fundamentado na medida das intensidades dos Raios X característicos, emitidos pelos elementos que constituem a amostra, quando excitada por partículas ou ondas eletromagnéticas.

Os Raios X emitidos excitam os elementos que constituem a amostra, elementos esses que por sua vez irradiarão linhas espectrais de energias características do elemento e, cujas intensidades, estão relacionadas com a concentração do elemento na amostra (Queirós, 2011). O equipamento utilizado, modelo *NITON XL3t* (900) da marca *Thermo Scientific*, permite a análise qualitativa e quantitativa de mais de 35 elementos químicos presentes numa rocha (Figura 32), incluindo oito metais pesados: o arsénio (As), o cádmio (Cd), o bário (Ba), o crómio (Cr), o chumbo (Pb), o mercúrio (Hg), o selénio (Se) e a prata (Ag).

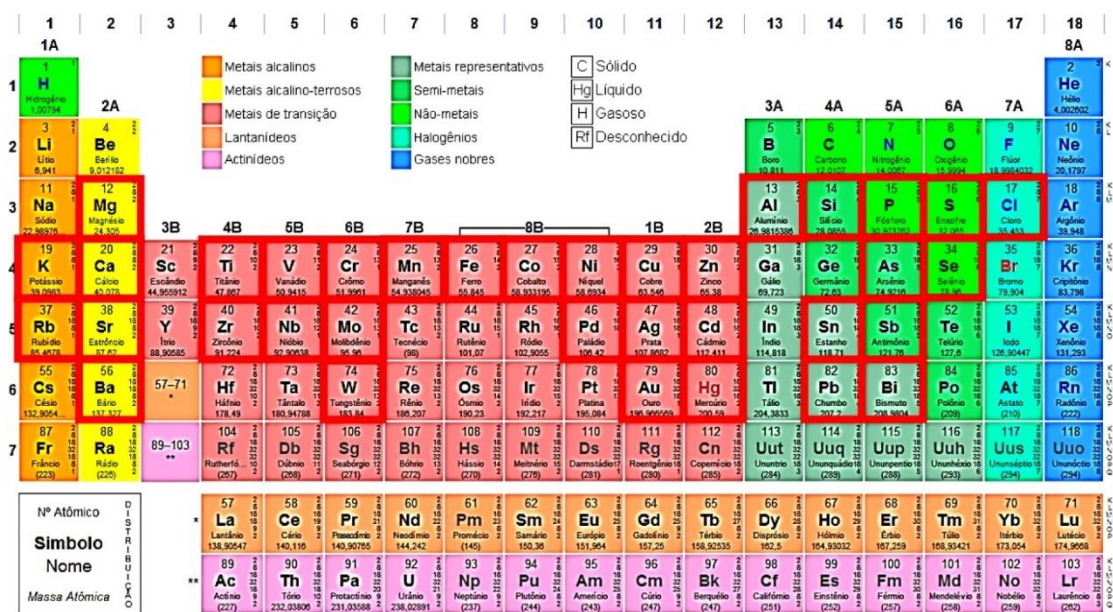


Figura 32 – Tabela periódica com os elementos químicos detetáveis pelo equipamento de fluorescência de Raios-X, NITON XL3 (900), assinalados a vermelho. (adaptado de <http://www.slideshare.net/EstudeMais/quimica-Tabela-periodica-dos-elementos,2014>).

APARELHOS E UTENSÍLIOS

Os aparelhos e utensílios utilizados foram os seguintes (Figura 33):

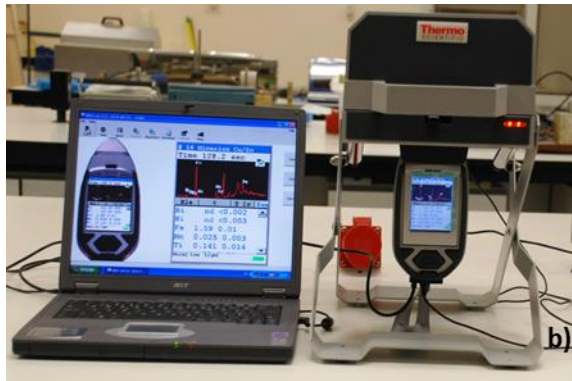


Figura 33 – Principais aparelhos e utensílios utilizados para o ensaio de análise química por fluorescência de raio X.

- Peneiro ASTM de malha quadrada de 63 μm de abertura, com fundo e tampa.
- Copos de amostra.
- Analisador por fluorescência de Raios X *NITON XL3t 900*.
- Câmara de suporte.
- Computador com software *NDT – transferência de dados NITON*.

PROCEDIMENTO

1. Proceder-se à separação ($< 63\mu\text{m}$) de dois provetes de cada solo a ensaiar, sendo a amostra devidamente esquartejada para que a quantidade necessária seja representativa.
2. Coloca-se o pó no “copo de amostra” devidamente acondicionado, verificando-se que não existem vazios entre as partículas.
3. Introduzir-se a amostra numa câmara suporte para a realização do ensaio em laboratório.
4. Faz-se a ligação a um computador com o software adequado (*NDT – transferência de dados NITON*), o qual possibilita a elaboração de relatórios de registo dos vários elementos detetados na amostra, em percentagem.
5. Realizam-se três leituras para cada provete de solo em estudo.
6. Uma vez obtidos os respetivos relatórios, os dados são tratados e determinam-se os valores médios de cada elemento encontrado, sendo depois convertidos para os respetivos compostos, através de uma folha de cálculo *Excel*.

4.9. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

O ensaio de condutividade elétrica tem como objetivo a determinação da salinidade de um determinado solo. Não está em vigor nenhuma norma para o ensaio de condutividade elétrica para solos em Portugal, portanto este procedimento foi baseado na norma australiana C1A/3.

APARELHOS E UTENSÍLIOS

Os aparelhos e utensílios utilizados foram os seguintes (Figura 34):

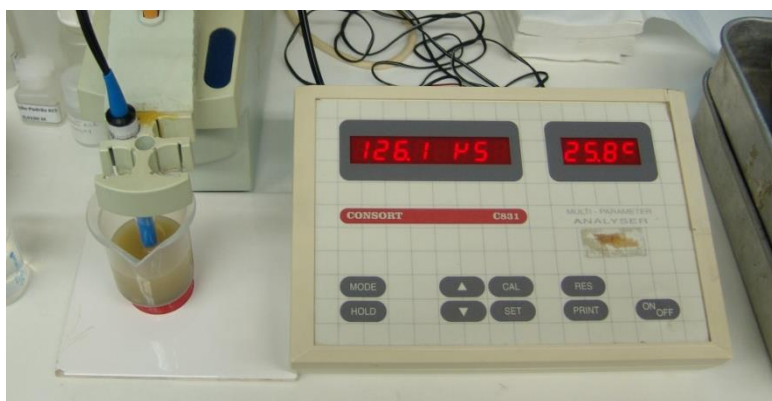


Figura 34 – Aparelhos e utensílios utilizados para o ensaio de condutividade elétrica.

- Água destilada.
- Solução de cloreto de potássio, contendo por litro 0,746 g de cloreto de potássio.
- Medidor de condutividade e célula.
- Recipientes para agitação.
- Peneiro ASTM de malha quadrada de 2 mm de abertura, com fundo e tampa.

PROCEDIMENTO

1. Prepara-se uma suspensão de solo com água destilada numa relação de 1:5, pesando-se 10 g de solo passado no peneiro de 2 mm e adicionando-se 50 ml de água destilada.
2. Agita-se mecanicamente a solução a 15 rpm durante uma hora para dissolver os sais solúveis.

3. Calibra-se o medidor de condutividade de acordo com as especificações do fabricante recorrendo à solução de cloreto de potássio preparada (esta solução tem uma condutividade elétrica de 1,413 dS/m, a 25°C).
4. Enche-se a célula de condutividade elétrica sem redistribuir manualmente o solo. A célula deve de ser lavada minuciosamente entre medições com água destilada.

4.10. POTENCIAL ELÉTRICO ZETA

O ensaio do micro eletrofosforase, ou técnica do potencial Zeta, tem como objetivo a determinação do comportamento das partículas de solo quando expostas a uma tensão elétrica em diferentes meios de pH. O equipamento de leitura regista uma série de imagens da suspensão enquanto está a ser aplicada uma tensão elétrica. Através de um *software* específico o operador identifica entre duas imagens registadas num curto espaço de tempo a posição das partículas, e o *software* calcula a variação da posição média dos sedimentos. É variada a polaridade, a tensão elétrica e o pH da solução. Este procedimento foi elaborado com base no manual de instruções do equipamento Powereach JS94 H.

APARELHOS E UTENSÍLIOS

Os aparelhos e utensílios utilizados foram os seguintes (Figura 35):



Figura 35 – Principais aparelhos e utensílios utilizados para o ensaio de potencial elétrico Zeta (<http://i01.yizimg.com/ComFolder/32595/200608/200686144510687>).

- Água destilada.
- Solução de hidróxido de sódio 0,1M.

- Solução de ácido hidroclorídrico 0,1M.
- Medidor de potencial Zeta (com *software*) e célula.
- Recipientes para agitação.
- Peneiro ASTM de malha quadrada de 2 mm de abertura, com fundo e tampa.

PROCEDIMENTO

1. Prepara-se uma suspensão de solo com água destilada pesando-se 50 mg de solo e adicionando-se 50 ml de água destilada.
2. Agita-se mecanicamente a solução durante uma hora para dissolver os sais solúveis e dispersar os sedimentos.
3. Adiciona-se a solução à célula de leitura, colocando-se esta no equipamento.
4. Através do *software* o operador determina a variação média do deslocamento das partículas em suspensão. (Figura 36)

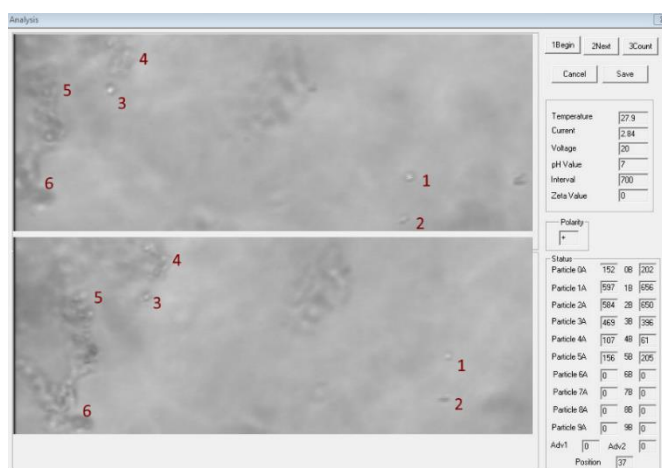


Figura 36 – Identificação da posição dos sedimentos pelo operador em *software* dedicado.

5. É variada a polaridade, e a tensão elétrica, de modo a que para cada solução se obtenham 4 valores de referência (polaridade positiva a 10 V, polaridade negativa a 10 V, polaridade positiva a 20 V, polaridade negativa a 20 V).
6. São adicionados 5 ml de hidróxido de sódio (0,1M) à suspensão de solo, agitando-se mecanicamente durante 30 minutos.
7. Repete-se os pontos 3 a 5 para a nova solução.
8. São adicionados 10 ml de ácido hidroclorídrico (0,1M) à suspensão de solo, agitando-se mecanicamente durante 30 minutos.
9. Repete-se os pontos 3 a 5 para a nova solução.

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

5.1.1. TEOR DE ÁGUA

Aquando da receção de cada uma das amostras foi determinado o seu teor de água (Tabela 9). Pela natureza do processo de envio das amostras internacionais (IN₁, IN₂ e ML_k), é natural assumir que o material perdeu humidade devido ao tempo de transporte. Quanto às amostras nacionais (PT_x e PT_G), uma vez que estas estiveram armazenadas durante um período de tempo incerto e com condições de armazenamento indefinidas antes da sua receção, é apropriado concluir que o teor de água destas deve ser desprezado.

Tabela 9 – Teor de água médio determinado para os diferentes solos.

AMOSTRA	PT _x		PT _G		IN ₁		IN ₂		ML _k	
CÁPSULA	4	2	6	77	S/Nº	7	2	6	4	7
PESO DA CÁPSULA (g)	11,04	10,85	10,8	36,73	34,27	11,22	10,81	10,79	11,02	11,22
PESO DA CÁPSULA + SOLO HÚMIDO (g)	64,1	63,54	55,58	240,09	276,01	62,41	79,04	82,63	65,76	58,69
PESO DA CÁPSULA + SOLO SECO (g)	60,64	60,05	50,79	209,7	238,5	57,04	66,76	70,37	62,26	55,54
PESO SOLO SECO (g)	49,6	49,2	39,99	172,97	204,23	45,82	55,95	59,58	51,24	44,32
PESO DA ÁGUA (g)	3,46	3,49	4,79	30,39	37,51	5,37	12,28	12,26	3,5	3,15
TEOR EM ÁGUA (%)	7,0	7,1	12,0	17,6	18,4	11,7	21,9	20,6	6,8	7,1
TEOR EM ÁGUA MÉDIO (%)	7,0		11,8		21,3		7,0		18,0	

5.1.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Nas Figuras 37, 38, 39, 40 e 41 encontram-se registadas as curvas granulométricas dos solos estudados.

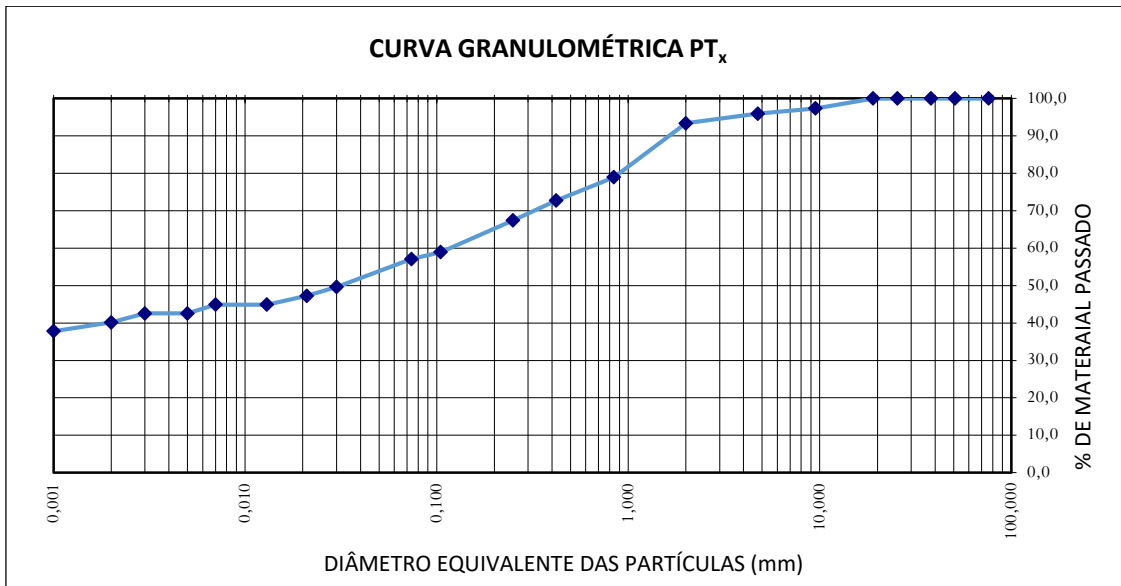


Figura 37 – Curvas granulométricas determinadas nos ensaios de peneiração húmida e sedimentação para o solo PT_x.

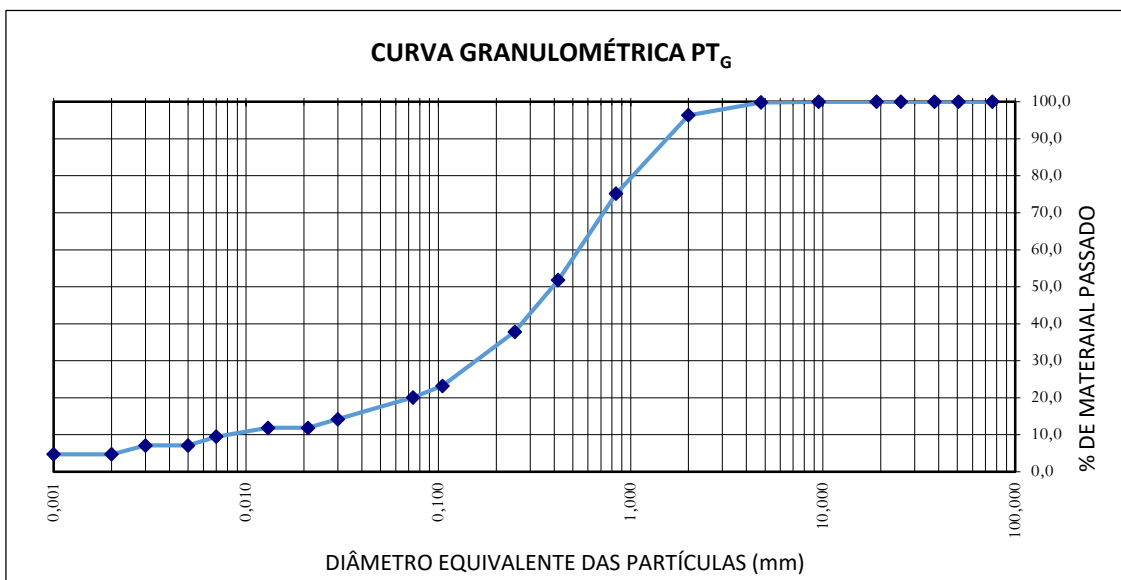


Figura 38 – Curvas granulométricas determinadas nos ensaios de peneiração húmida e sedimentação para o solo PT_G.

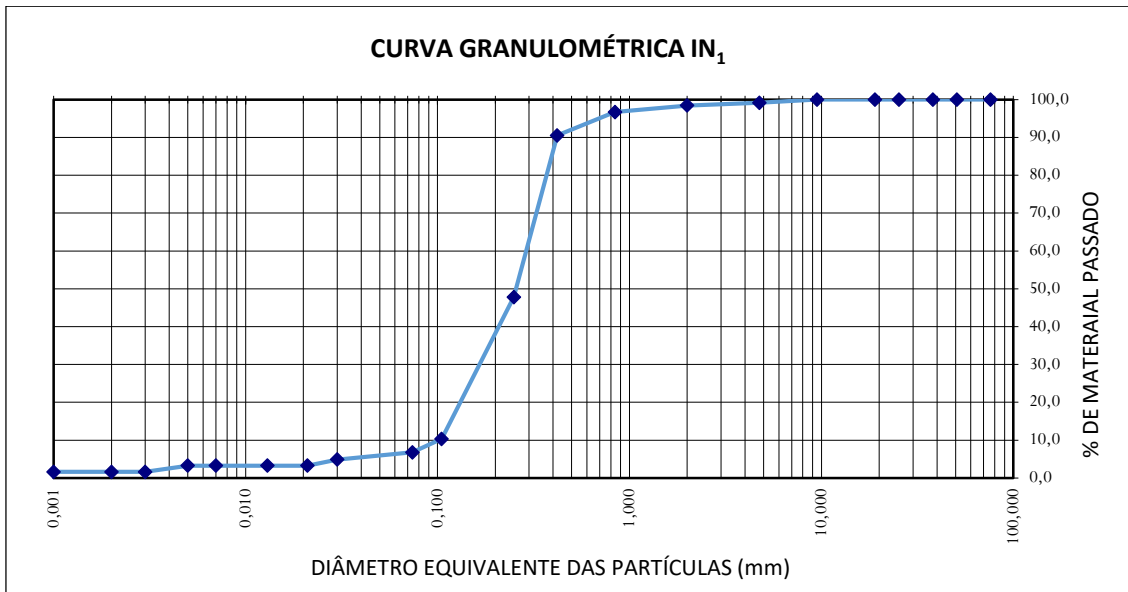


Figura 39 – Curvas granulométricas determinadas nos ensaios de peneiração húmida e sedimentação para o solo IN₁.

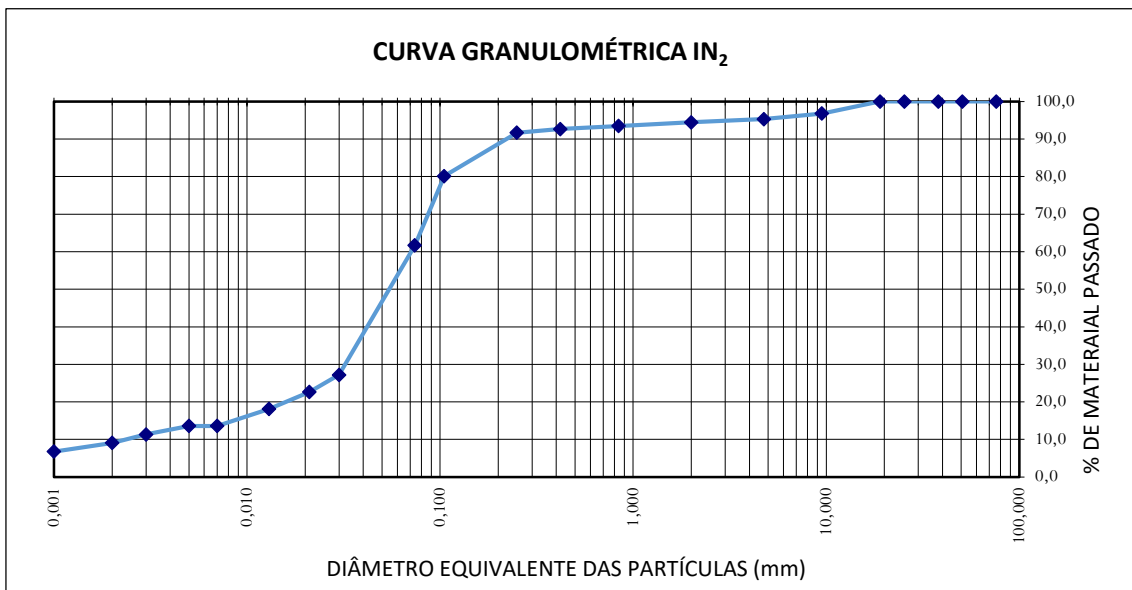


Figura 40 – Curvas granulométricas determinadas nos ensaios de peneiração húmida e sedimentação para o solo IN₂.

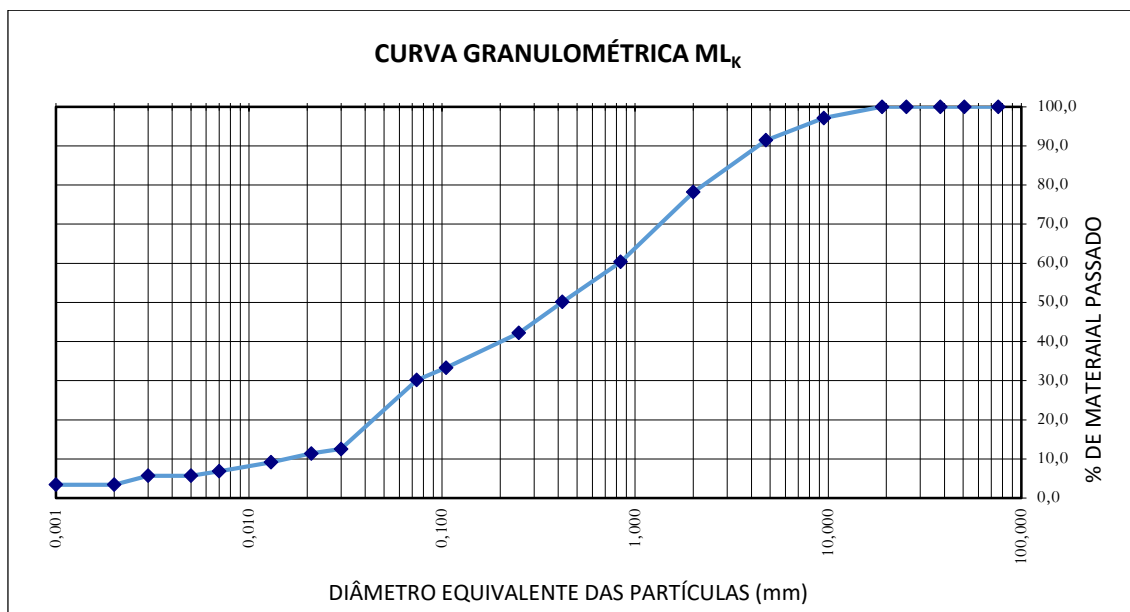


Figura 41 – Curvas granulométricas determinadas nos ensaios de peneiração húmida e sedimentação para o solo ML_k.

A Tabela 10 apresenta as classes granulométricas de cada solo de acordo com o definido pelo LNEC (1966). Os valores estão arredondados à unidade porque foram determinados visualmente recorrendo às curvas granulométricas.

Tabela 10 – Classes granulométricas em vigor em Portugal (LNEC, 1966).

CLASSES GRANULOMÉTRICAS (%)											
	PT _x	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _k		PT _x	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _k
SEIXO GROSSO (60 - 20 mm)	0	0	0	0	0	SEIXO (2 - 60 mm)	7	4	2	6	22
SEIXO MÉDIO (6 - 20 mm)	4	0	0	4	6						
SEIXO FINO (2 - 6 mm)	3	4	2	2	16						
AREIA GROSSA (0,6 - 2 mm)	17	32	4	1	22	AREIA (0,06 - 2 mm)	36	77	91	40	51
AREIA MÉDIA (0,2 - 0,6 mm)	10	29	56	4	16						
AREIA FINA (0,06 - 0,2 mm)	9	16	31	35	13						
SILTE GROSSO (0,02 - 0,06 mm)	9	7	4	32	16	SILTE (0,002 - 0,006 mm)	17	14	5	45	24
SILTE MÉDIO (0,006 - 0,02 mm)	4	3	0	8	4						
SILTE FINO (0,002 - 0,006 mm)	4	4	1	5	4						
ARGILA (< 0,002 mm)	40	5	2	9	3	ARGILA (< 0,002 mm)	40	5	2	9	3

A partir das curvas granulométricas é possível calcular os coeficientes de uniformidade e curvatura (Tabela 11). A percentagem mínima de material passado para o solo PT_x é de cerca de 38%, para

um diâmetro de 0,001 mm, pelo que não é possível calcular os valores de D_{10} e D_{30} , e consequentemente os coeficientes de uniformidade e curvatura.

Tabela 11 – Classificação dos coeficientes e uniformidade (C_u) e curvatura (C_c)

	PT_x	PT_G	IN_1	IN_2	ML_K
D_{10}	-	0,009	0,100	0,002	0,015
D_{30}	-	0,150	0,160	0,013	0,070
D_{60}	0,120	0,520	0,300	0,070	0,840
C_u	-	4,8 (bem graduado)	0,9 (uniforme)	1,1 (uniforme)	0,4 (mal graduado)
C_c	-	57,7	3,0	35,0	56,0

A partir dos valores dos coeficientes de curvatura e dos valores de limites de consistência é possível chegar a uma classificação USCS para os solos (Tabela 12).

Tabela 12 – Classificação USCS dos diferentes solos determinada a partir dos ensaios de peneiração húmida e limites de consistência.

Classificação dos solos USCS				
PT_x	PT_G	IN_1	IN_2	ML_K
Argila magra (CL)	Areia siltosa (SM)	Areia mal graduada (SP)	Areia argilosa (SC)	Areia siltosa (SM)

5.1.3. LIMITES DE CONSISTÊNCIA

A partir dos ensaios de limite de liquidez foi possível construir os gráficos registados nas Figuras 42, 43 e 44.

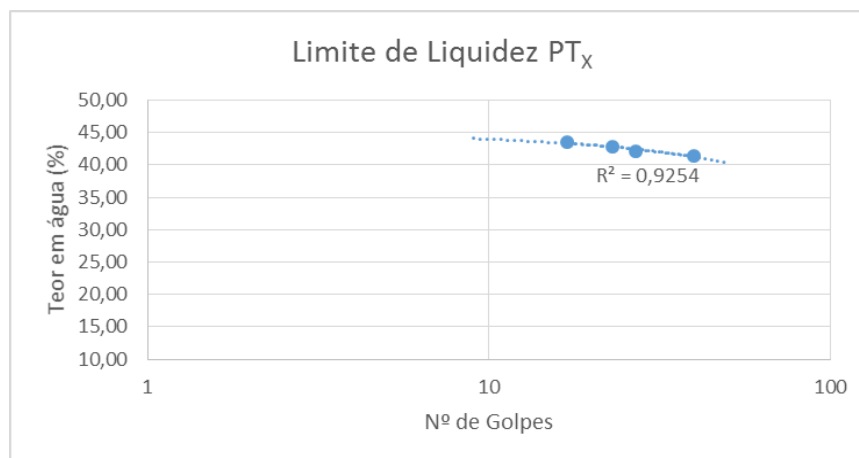


Figura 42 – Número de pancadas em função do teor de água no ensaio de limite de liquidez para o solo PT_x .

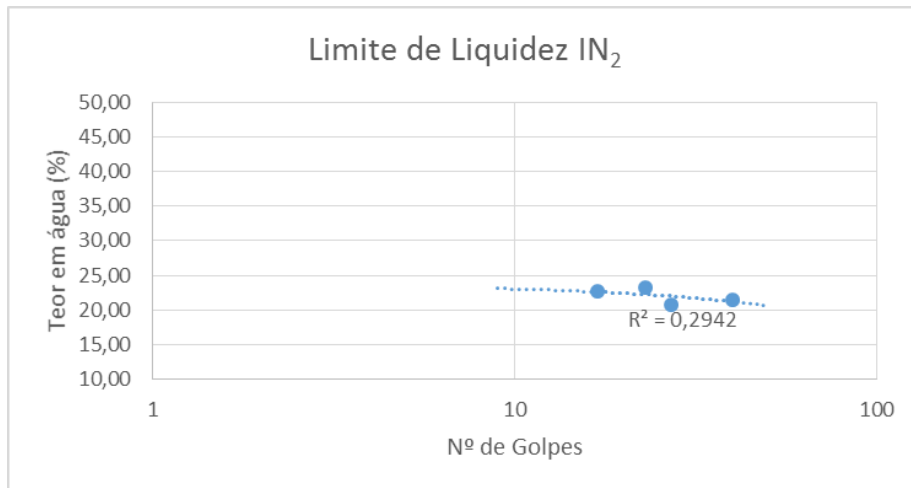


Figura 43 – Número de pancadas em função do teor de água no ensaio de limite de liquidez para o solo IN_2 .

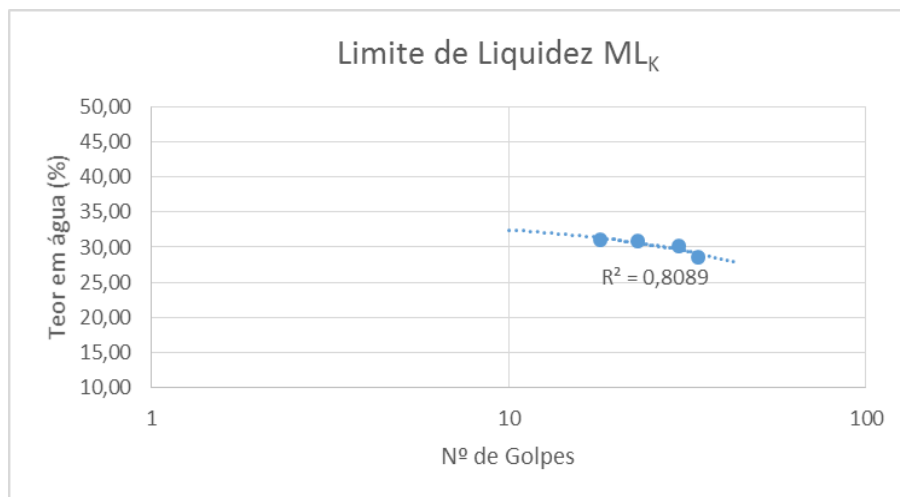


Figura 44 – Número de pancadas em função do teor de água no ensaio de limite de liquidez para o solo ML_K .

Os valores dos limites de consistência dos solos estudados encontram-se registrados nas Tabelas 13, 14 e 15. Não foram calculados os limites de consistência para os solos PT_G e IN_1 já que estes apresentam uma fração de solo inferior a 0,05 mm menor do que 30%. Mesmo que fossem calculados os limites para estes solos o seu valor perderia significado.

Tabela 13 – Limites de consistência determinados para o solo PT_x.

PT _x					
LIMITE DE LIQUIDEZ	Nº DA CÁPSULA	3	8	10	22
	PESO DA CÁPSULA (g)	5,59	5,47	5,56	5,55
	PESO DA CÁPSULA + SOLO HÚMIDO (g)	13,65	16,23	13,93	14,4
	PESO DA CÁPSULA + SOLO SECO (g)	11,23	12,97	11,48	11,78
	PESO DO SOLO SECO (g)	5,64	7,50	5,92	6,23
	PESO DA ÁGUA (g)	2,42	3,26	2,45	2,62
	TEOR EM ÁGUA (%)	42,91	43,47	41,39	42,05
	Nº DE GOLPES	23	17	40	27
	EQUAÇÃO DA RETA	-0,0842x+44,658			
	W _L (%)	42,55			
LIMITE DE PLASTICIDADE	Nº DA CÁPSULA	1	8	21	22
	PESO DA CÁPSULA (g)	5,65	5,47	5,39	5,54
	PESO DA CÁPSULA + SOLO HÚMIDO (g)	6,96	6,1	6,53	6,44
	PESO DA CÁPSULA + SOLO SECO (g)	6,71	5,98	6,3	6,26
	PESO DO SOLO SECO (g)	1,06	0,51	0,91	0,72
	PESO DA ÁGUA (g)	0,25	0,12	0,23	0,18
	TEOR EM ÁGUA (%)	23,58	23,53	25,27	25,00
	W _P (%)	24,35			

Tabela 14 – Limites de consistência determinados para o solo IN₂.

IN ₂					
LIMITE DE LIQUIDEZ	Nº DA CÁPSULA	12	10	15	3
	PESO DA CÁPSULA (g)	5,49	5,55	5,56	5,58
	PESO DA CÁPSULA + SOLO HÚMIDO (g)	14,58	16,39	14,88	18,09
	PESO DA CÁPSULA + SOLO SECO (g)	12,87	14,39	13,23	15,94
	PESO DO SOLO SECO (g)	7,38	8,84	7,67	10,36
	PESO DA ÁGUA (g)	1,71	2,00	1,65	2,15
	TEOR EM ÁGUA (%)	23,17	22,62	21,51	20,75
	Nº DE GOLPES	23	17	40	27
	EQUAÇÃO DA RETA	-0,0606*25+23,636			
	W _L (%)	22,12			
LIMITE DE PLASTICIDADE	-	Não plástico (NP)			

Tabela 15 – Limites de consistência determinados para o solo ML_k.

ML _k					
LIMITE DE LIQUIDEZ	Nº DA CÁPSULA	2	30	22	13
	PESO DA CÁPSULA (g)	5,45	5,53	5,57	5,46
	PESO DA CÁPSULA + SOLO HÚMIDO (g)	11,74	14,53	11,43	12,44
	PESO DA CÁPSULA + SOLO SECO (g)	10,25	12,53	10,05	10,82
	PESO DO SOLO SECO (g)	4,80	7,00	4,48	5,36
	PESO DA ÁGUA (g)	1,49	2,00	1,38	1,62
	TEOR EM ÁGUA (%)	31,04	28,57	30,80	30,22
	Nº DE GOLPES	18	34	23	30
	EQUAÇÃO DA RETA	-0,1403x+33,844			
	W _L (%)	30,34			
LIMITE DE PLASTICIDADE	Nº DA CÁPSULA	18	16	6	7
	PESO DA CÁPSULA (g)	5,54	5,62	5,54	5,32
	PESO DA CÁPSULA + SOLO HÚMIDO (g)	6,99	8,07	9,34	6,48
	PESO DA CÁPSULA + SOLO SECO (g)	6,72	7,62	8,65	6,27
	PESO DO SOLO SECO (g)	1,18	2,00	3,11	0,95
	PESO DA ÁGUA (g)	0,27	0,45	0,69	0,21
	TEOR EM ÁGUA (%)	22,88	22,50	22,19	22,11
	W _P (%)	22,42			

Relativamente ao solo IN₂, é de notar que o ensaio de limite de plasticidade não foi aplicável devido ao comportamento do solo. Assim sendo, este é classificado como Não Plástico (NP). Quanto ao índice de plasticidade, o solo ML_k pode ser classificado como pouco a medianamente plástico, enquanto que os solos PT_x e IN₂ são muito plásticos.

5.1.4. EQUIVALENTE DE AREIA

Na Tabela 16 estão registados os valores de equivalente de areia dos solos estudados.

Tabela 16 – Equivalente de areia determinado para os diferentes solos.

	PT _x		PT _G		IN ₁		IN ₂		ML _k	
m (g)	117,23	117,22	121,72	122,03	120,38	120,83	121,74	122,75	120,45	120,95
h ₁ (cm)	32,0	30,1	17,2	19,4	14,1	14,1	25,0	25,4	29,2	29,3
h' ₂ (cm)	-	-	8,0	8,0	-	-	-	-	4,5	4,0
h ₃ (cm)	7,0	6,7	14,5	14,4	13,1	13,2	7,7	7,5	11,5	11,6
E.A.	21,88	22,26	84,30	74,23	92,91	93,62	30,80	29,53	39,38	39,59
E.A.V.	-	-	46,51	41,24	-	-	-	-	15,41	13,65

É possível verificar que os solos IN₁ e PT_G apresentam valores de E.A. elevados, ao contrário dos outros solos que apresentam valores uniformemente baixos.

5.1.5. MASSA ESPECÍFICA

Na Tabela 17 e 18 encontram-se registados os cálculos de massa específica dos solos estudados.

Tabela 17 – Calibração do picnómetro para o ensaio de massa específica.

CALIBRAÇÃO PICNÓMETRO	
m₁ (g)	204,28
m₂ (g)	584,38
t (°C)	27
d₁	0,99654
m₃ (g)	583,06

Tabela 18 – Cálculos para a determinação da massa específica.

	PT _X	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _K
m₄ (g)	27,56	26,95	29,77	28,48	25,05
m₅ (g)	601,32	601,79	603,65	603,27	600,22
m₃ (g)	583,06				
t (°C)	27				
K	0,998				
d	2,96	3,27	3,23	3,43	3,17

É possível notar que todos os solos apresentam valores de massa específica semelhantes.

5.1.6. AZUL-DE-METILENO

Na Tabela 19 encontram-se registados os valores de azul de metileno dos solos estudados.

- Relativamente à massa específica é possível notar uma

Tabela 19 – Valor de azul de metileno determinado para os diferentes solos.

	PT _X	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _K
m₁ (g)	30,62	45,62	60,2	31,56	46,43
V₁ (ml)	70	19	10	24	15
MB (g DE CORANTE/kg SOLO)	22,86	4,16	1,66	7,60	3,23

Todos os solos estudados apresentam valores de MB semelhantes, exceto o solo PT_x, que em muito excede o valor médio verificado nos outros solos.

5.1.7. SALINIDADE

Na Tabela 20 encontram-se registados os valores de condutividade elétrica dos solos estudados.

Tabela 20 – Condutividade elétrica determinada para os diferentes solos.

CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (μS/cm)				
PT _x	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _K
147,9	31,6	134,4	181,8	232,0

Todos os solos estudados apresentam valores de condutividade elétrica semelhantes, exceto o solo PT_G, que é bastante inferior ao valor médio verificado nos outros solos.

5.1.8. PERMEABILIDADE

Como já foi explicado anteriormente, não houve possibilidade de calcular a permeabilidade dos solos em laboratório, já que as amostras obtidas não eram intactas. Assim, e apenas para se obter uma ordem de grandeza dos mesmos, estes foram calculados através de relações empíricas.

Na Tabela 21 encontram-se registados os valores da permeabilidade calculados para os solos estudados. Foram considerados 981 cm.sec⁻² como a aceleração gravítica (*g*) e 1,004 mm².seg⁻¹ como viscosidade cinemática da água a 20°C (*v*). Não foi possível calcular qualquer valor para a permeabilidade do solo PT_x já que este não apresenta valores para D₅, D₁₀ e D₂₀.

Tabela 21 – Permeabilidade determinada para os diferentes solos a partir dos ensaios de peneiração húmida e sedimentação.

PERMEABILIDADE (CM/S)						
MÉTODOS EMPÍRICOS		PT _x	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _K
Kenney et al. (1984)	$k = (0,005) * D_5^2$	-	#2,0*10 ⁻⁶	#4,5*10 ⁻⁴	-	#4,5*10 ⁻⁶
Breyer-Kresic (1998)	$k = 6 * 10^{-2} * \frac{g}{v} * \log\left(\frac{500}{C_u}\right) * D_{10}^2$	-	#1,11*10 ⁻⁵	1,89*10 ⁻³	#7,1*10 ⁻⁷	#4,74*10 ⁻⁵
USBR- (Vukovic and Soro, 1992)	$k = 0.048 * \frac{g}{v} * D_{20}^{0,3} * D_{10}^2$	-	2,01*10 ⁻⁶	2,94*10 ⁻⁴	6,39*10 ⁻⁸	4,72*10 ⁻⁶
Alyamani and Şen (1993)	$k = 1.5046 * (I_0 + 0.025 * (D_{50} - D_{10}))^2$	-	2,45*10 ⁻⁵	9,83*10 ⁻⁴	7,69*10 ⁻⁷	#8,2*10 ⁻⁶

Método pouco fiável para o solo

5.1.9. FORÇAS ATRATIVAS E REPULSIVAS

Na Tabela 22 encontram-se registados os valores do potencial elétrico Zeta calculados para os solos estudados. Como foi referido anteriormente este ensaio não foi realizado para todos os solos já que o equipamento utilizado apenas produz resultados confiáveis para solos com uma fração de material fino considerável.

Tabela 22 – Valores de potencial elétrico Zeta calculado para os diferentes solos.

pH	PT _x	IN ₂	ML _k
2	17,61	4,32	5,68
	-3,46	-2,99	-3,21
	1,87	6,93	5,18
	-14,4	-6,57	-3,98
5,5	2,64	12,52	12,52
	-3,34	-9,04	-9,04
	3,43	4,33	4,33
	-18,37	-4,32	-4,32
11,5	7,98	31,57	31,57
	-6,35	-37,15	-37,15
	3,05	6,82	6,82
	-5,33	-9,15	-9,15

A partir da Tabela 22 foram construídos os gráficos de variação do potencial elétrico de acordo com o pH representados nas figuras 45, 46 e 47.

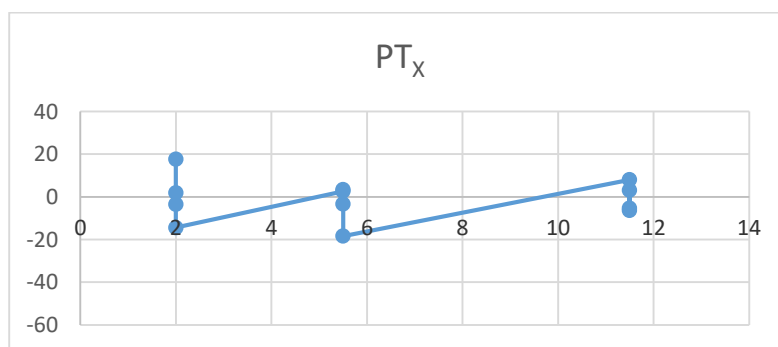


Figura 45 – Variação do potencial elétrico de acordo com o pH no ensaio de potencial Zeta de para o solo PT_x.

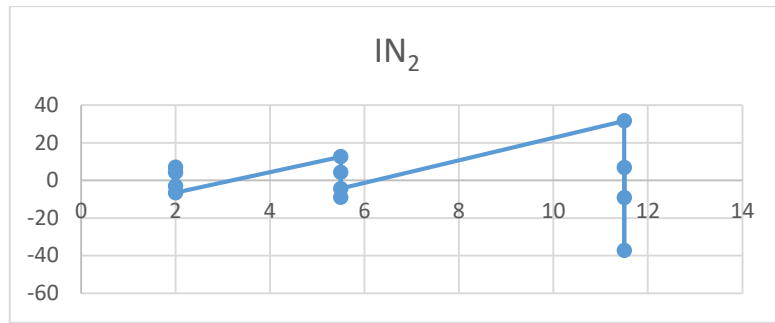


Figura 46 - Variação do potencial elétrico de acordo com o pH no ensaio de potencial Zeta de para o solo IN₂.

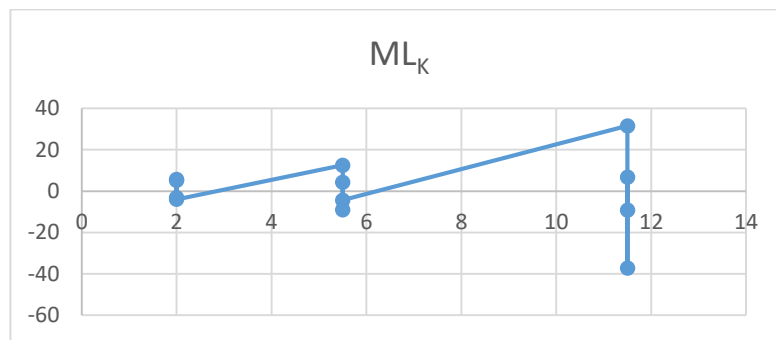


Figura 47 – Variação do potencial elétrico de acordo com o pH no ensaio de potencial Zeta de para o solo ML_K.

Este ensaio apenas foi realizado para solos com elevado teor de finos, já que os resultados para solos arenosos não são conclusivos em relação ao comportamento real das partículas.

Os solos IN₂ e ML_K têm um comportamento semelhante em que o potencial elétrico das partículas aumenta à medida que o pH aumenta. No entanto, o mesmo não se verifica com o solo PT_X, no qual, ao contrário dos outros, o potencial elétrico aumenta à medida que o pH diminui. Também é possível notar a amplitude máxima de potencial Zeta para os vários solos (Tabela 23).

Tabela 23 – Amplitude máxima do potencial elétrico determinado a partir do ensaio de potencial Zeta para os diferentes solos.

AMPLITUDE MÁXIMA DE POTENCIAL ELÉTRICO (mV)		
PT _X	IN ₂	ML _K
-14,4 a 17,61	-37,15 a 31,57	-30,89 a 29,83

5.1.10. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

As concentrações relativas dos óxidos presentes nos solos estudados estão registadas nas Figuras 48, 49, 50, 51 e 52 (dadas as presenças vestigiais de alguns elementos apenas se representam

graficamente os mais significativos). Os valores tabelados não totalizam 100% já que apenas estão a ser contabilizadas as concentrações de 39 dos óxidos existentes em cada solo, e também não são consideradas as estruturas minerais presentes que não sejam formadas por óxidos.

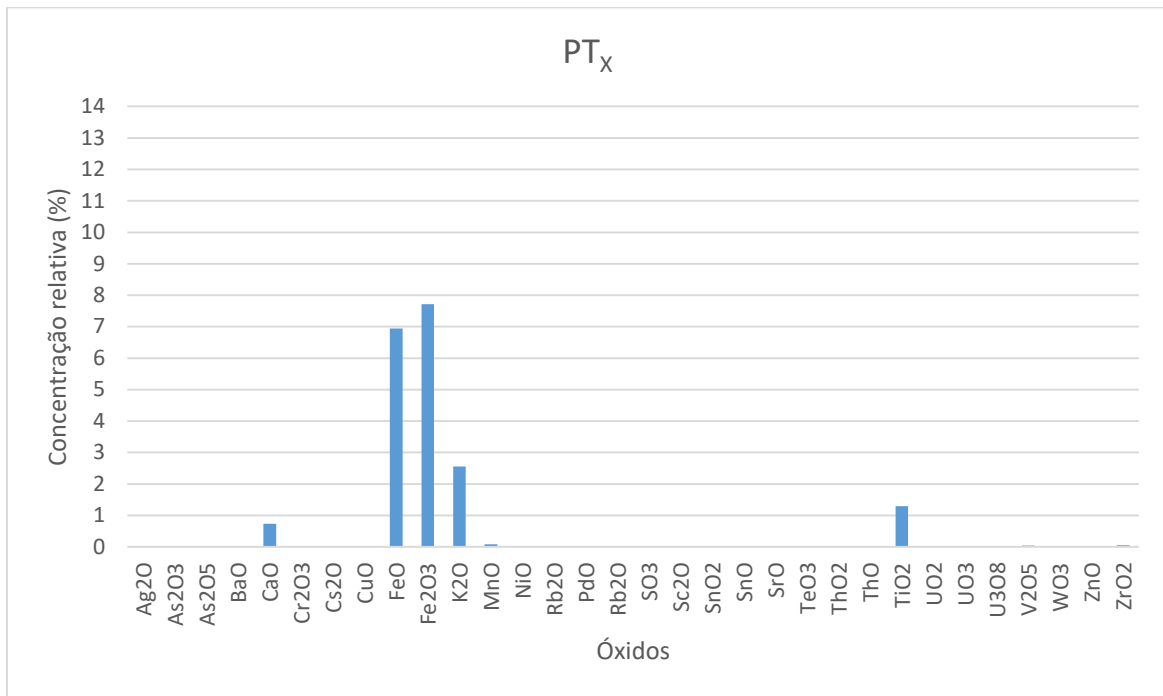


Figura 48 - Concentração relativa dos óxidos determinados pelo método de espectrometria de fluorescência de raio X no solo PT_x.

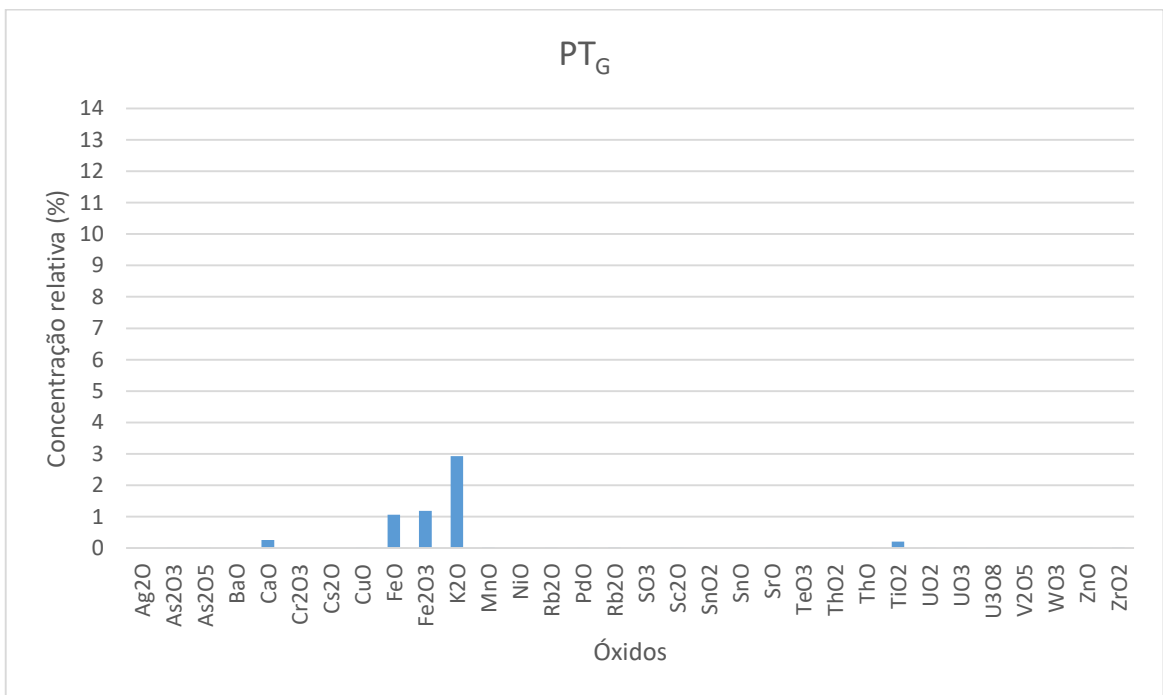


Figura 49 - Concentração relativa dos óxidos determinados pelo método de espectrometria de fluorescência de raio X no solo PT_g.

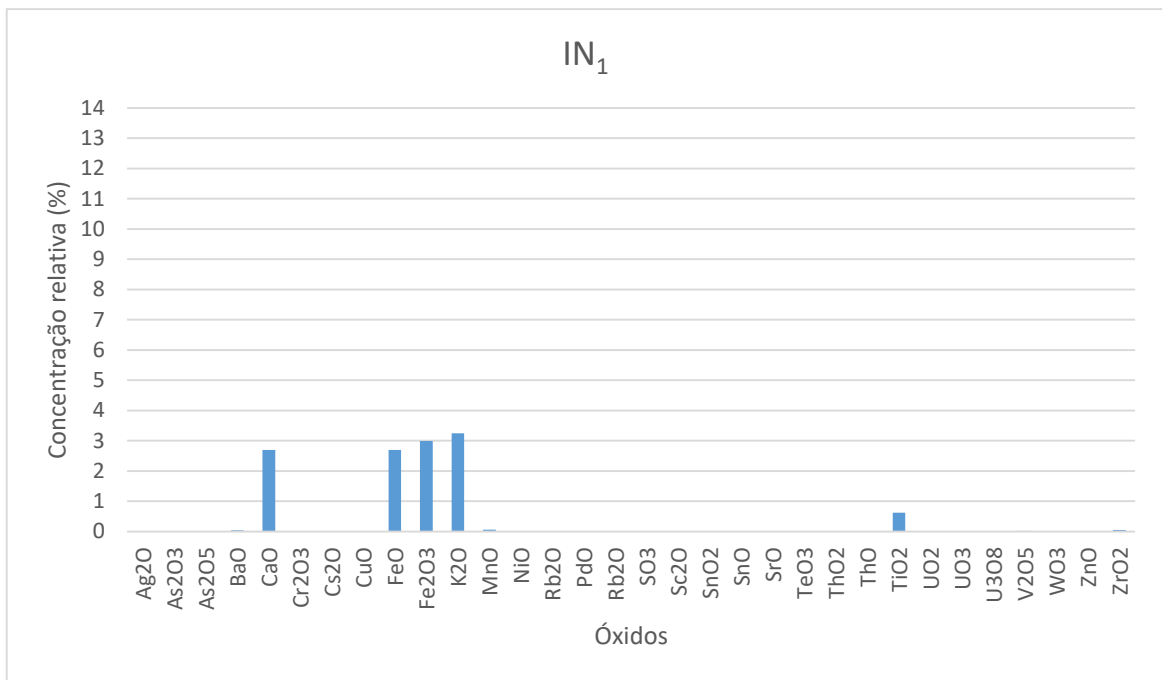


Figura 50 - Concentração relativa dos óxidos determinados pelo método de espectrometria de fluorescência de raio X no solo IN₁.

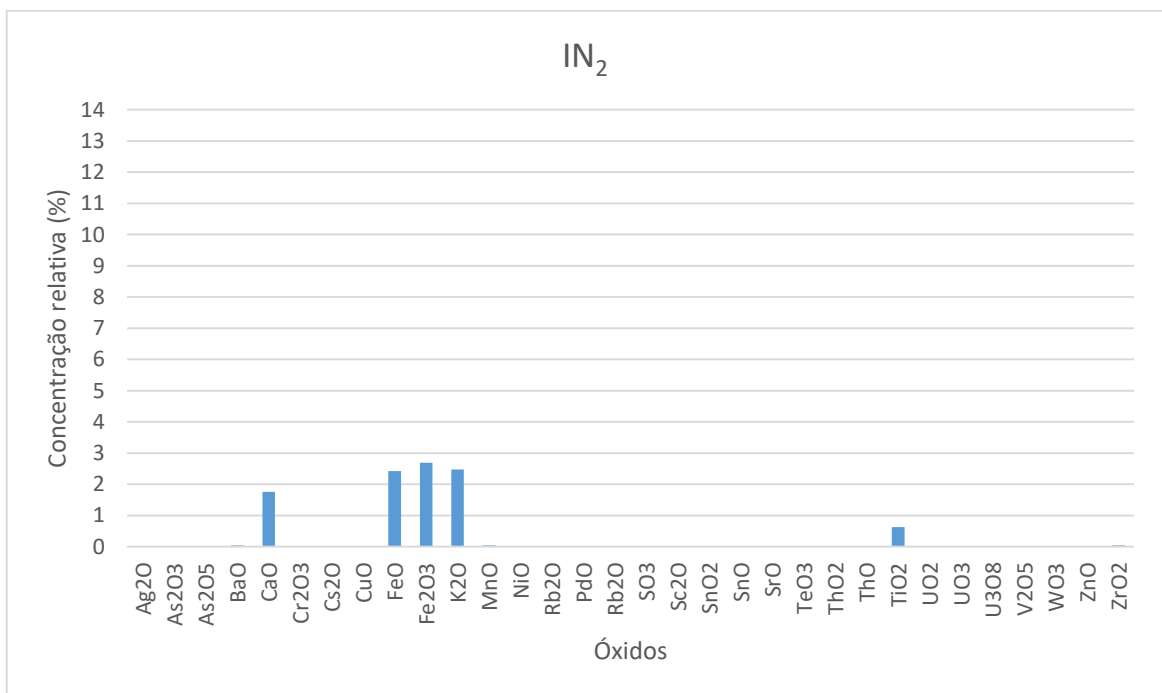


Figura 51 - Concentração relativa dos óxidos determinados pelo método de espectrometria de fluorescência de raio X no solo IN₂.

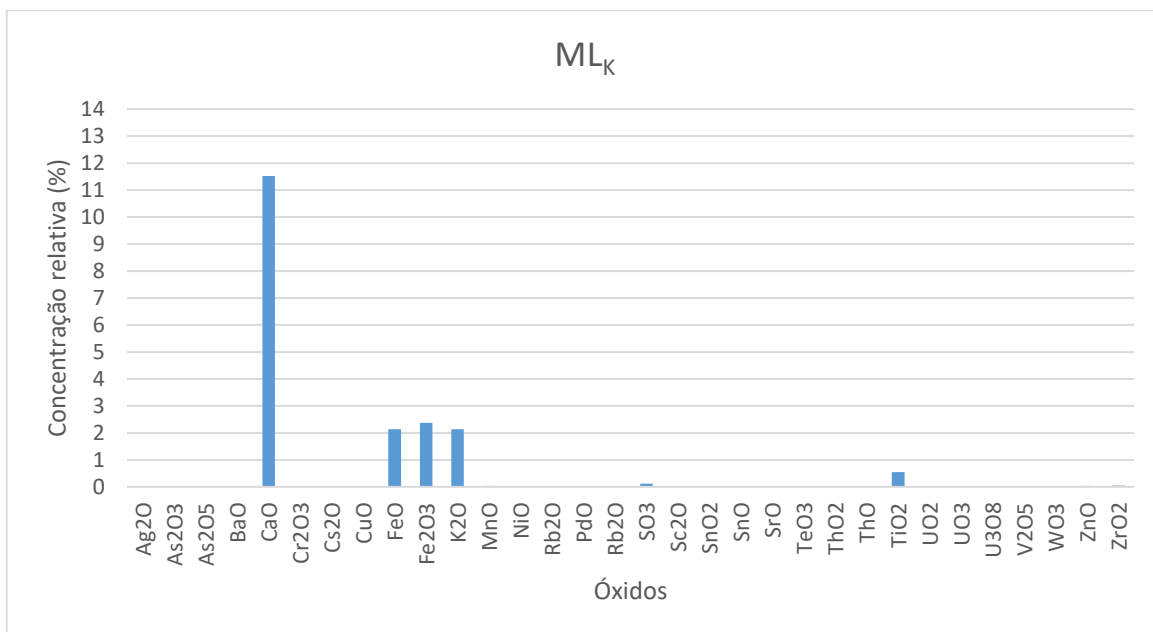


Figura 52 – Concentração relativa dos óxidos determinados pelo método de espectrometria de fluorescência de raio X no solo ML_k.

É possível verificar logo à partida que a maioria dos óxidos detetados pelo ensaio encontram-se em concentrações relativas bastante baixas, pelo que a sua representação visual junto com os outros elementos não é conclusiva. O solo PT_x apresenta uma concentração muito elevada de óxidos de ferro (FeO e Fe₂O₃) comparativamente com os outros solos - mais de três vezes a concentração média nos outros solos. Isto explica a cor avermelhada deste solo.

O solo PT_G apresenta uma concentração baixa de óxidos de ferro (FeO e Fe₂O₃) comparativamente com os outros solos - cerca de metade da concentração média nos outros solos (excluindo PT_x). Também tem baixas concentrações de óxido de cálcio (CaO) - cerca de 7 vezes menos a concentração média dos outros solos (excluindo ML_k).

O solo ML_k apresenta uma concentração muito elevada de óxido de cálcio (CaO) comparativamente com os outros solos - mais de oito vezes a concentração média nos outros solos.

5.1.11. COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA ESTIMADA

Na Tabela 24 encontram-se registados os valores calculados da atividade coloidal dos solos estudados.

Tabela 24 – Atividade do solo calculada para os diferentes solos a partir do ensaio de sedimentação.

ATIVIDADE COLOIDAL				
PT _x	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _K
0,45 (pouco ativa)	-	-	2,43 (muito ativa)	2,20 (muito ativa)

Com base nos valores da atividade coloidal das argilas é possível inferir os minerais presentes no solo (Tabela 25). O solo PT_x terá a presença do mineral argiloso do tipo Illite (já que o valor de AC insere-se no intervalo 0,23 – 0,80 e este mineral é rico em ferro, o que corresponde à elevada concentração de óxidos de ferro deste solo; o solo IN₂ poderá derivar de montemorilonite (o valor de AC situa-se na região dos intervalos correspondente às duas variações deste mineral, 0,32 – 3,09 e 1,12 – 11,5, no entanto a análise química deste solo não revelou concentrações atípicas de elementos correspondentes a estes minerais, pelo que este estudo não é conclusivo); e, por fim, o solo ML_K terá a presença de calcite (o solo apresentou muito elevadas concentrações de CaO, e o valor de AC encontra-se na região do valor de referência para o mineral, correspondente a 1,8).

Quanto aos solos PT_G e IN₁, já que estes apresentam baixas quantidades de material de dimensões inferiores a 0,05 mm (< 30%) não é possível calcular o Índice de Plasticidade, pelo que o valor de AC é nulo. No entanto, pelo aspeto visual é possível inferir que ambos os solos terão sido formados a partir de rochas graníticas. O solo PT_G era claro e continha esferas graníticas bastante alteradas. O seu manuseio, inclusivamente, levava à sua desagregação, pelo que se poderá considerar que este solo continha argilas derivadas de caulinite.

O solo IN₁ tinha um teor de finos extremamente baixo, pelo que se pode extrapolar que o mineral de predominante seria quartzo.

Tabela 25 – Minerais de argila, de quartzo e de calcite presentes nos diferentes solos determinados a partir da atividade das argilas e da espectrometria de fluorescência de raio X.

MINERAIS DE ARGILA				
PT _x	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _K
Illite	Caulinite [#]	Quartzo [#]	Montemorilonite	Calcite

[#] Determinado através do aspeto, comportamento macroscópico e análise granulométrica.

Na Tabela 26 encontram-se agregada a informação inferida a partir dos ensaios realizados relativamente aos solos estudados.

Tabela 26 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios realizados sobre os solos em análise.

		PT _x	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _K
TEOR DE ÁGUA (%)		7,0	11,8	21,3	7,0	18,0
GRANULOMETRIA	COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE - C_u	-	4,8 (bem graduado)	0,9 (uniforme)	1,1 (uniforme)	0,4 (mal graduado)
	COEFICIENTE DE CURVATURA - C_c	-	57,7	3,0	35,0	56,0
	CLASSIFICAÇÃO USCS	Argila magra (CL)	Areia siltosa (SM)	Areia mal graduada (SP)	Areia argilosa (SC)	Areia siltosa (SM)
LIMITE DE LIQUIDEZ - W_L (%)		42,55	-	-	22,12	30,34
LIMITE DE PLASTICIDADE - W_p (%)		24,35	-	-	NP	22,42
ÍNDICE DE PLASTICIDADE – IP (%)		18,2	-	-	22,12	7,42
EQUIVALENTE DE AREIA (%)		22,1	79,3	93,3	30,2	39,5
MASSA ESPECÍFICA (g/cm³)		2,96	3,27	3,23	3,43	3,17
AZUL DE METILENO (G DE A.M./kg DE SOLO)		22,86	4,16	1,66	7,60	3,23
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (μS/CM)		147,9	31,6	134,4	181,8	232,0
PERMEABILIDADE	KENNEY ET AL. (1984)	-	#2,0*10 ⁻⁶	#4,5*10 ⁻⁴	-	#4,5*10 ⁻⁶
	BREYER-KRESIC (1998)	-	#1,11*10 ⁻⁵	1,89*10 ⁻³	#7,1*10 ⁻⁷	#4,74*10 ⁻⁵
	USBR- (VUKOVIC AND SORO, 1992)	-	2,01*10 ⁻⁶	2,94*10 ⁻⁴	6,39*10 ⁻⁸	4,72*10 ⁻⁶
	ALYAMANI AND ŞEN (1993)	-	2,45*10 ⁻⁵	9,83*10 ⁻⁴	7,69*10 ⁻⁷	#8,2*10 ⁻⁶
POTENCIAL ELÉTRICO (mV)		-14,4 a 17,61 (meio ácido)	-	-	-37,15 a 31,57 (meio alcalino)	-30,89 a 29,83 (meio alcalino)
ATIVIDADE COLOIDAL		0,45 (pouco ativa)	-	-	2,43 (muito ativa)	2,20 (muito ativa)
MINERALOGIA		llite	#Caulinite	#Quartzo	Montemorilonite	Calcite

Valor pouco fiável para o solo

5.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir dos ensaios realizados, foi possível estabelecer várias relações entre as propriedades dos solos:

- O solo que apresenta características granulométricas mais divergentes de todos os outros é o PT_x, que segundo a classificação USCS é denominado de argila magra (CL). A grande quantidade de argilas neste solo pode ser derivada da composição mineralógica, ilite. Este mineral é constituído por óxidos de ferro e, portanto, a sua meteorização é mais acentuada relativamente aos outros solos com composições diferentes.

O solo IN₁ apresenta uma faixa granulométrica estreita, sendo classificado como uma areia mal graduada (SP). Isto provavelmente advém de condições geológicas particulares ao local originário da amostra. Já que há uma quantidade bastante reduzida de finos, é possível que este solo tenha sido de alguma forma “lavado” da sua fração argilosa. Isto vai de encontro aos resultados do ensaio de equivalente de areia, no qual este solo apresentou um valor de E.A. bastante elevado, principalmente em comparação com os outros solos, que têm uma granulometria mais extensa.

- Relativamente à massa específica é possível notar uma semelhança significativa entre os valores de todos os solos. Isto pode significar que este não é um fator determinante na diferenciação de solos.
- A condutividade elétrica do solo PT_G é inferior aos restantes solos. Isto poderá dever-se à baixa concentração de óxidos de ferro neste solo, já que este fator parece ser o único estudado que diferencia este solo dos restantes.
- Quanto à permeabilidade, cada um dos métodos empíricos resulta em valores diferentes para cada solo, no entanto, isso já era expectável, sendo que apenas deverá ser comparado o grau de grandeza em vez de valores concretos. O solo IN₁ apresenta uma permeabilidade de grau de grandeza bastante superior aos restantes solos. Isto advém do facto de este solo ser classificado como uma areia mal graduada (SP). Há um teor muito baixo de finos (6,8% < 0,074 mm), pelo que os vazios pelos quais a água poderá escorrer são em maior número (Feitosa & Filho, 2000).

É expectável que o solo PT_x apresente uma permeabilidade muito inferior aos outros solos devido ao elevado teor de argilas, no entanto não é possível calcular nenhum valor de permeabilidade para este solo pelos métodos empíricos.

- O intervalo de potencial eléctrico para o solo PT_x (-14,4 a 17,61 mV para meio ácido) encontra-se abaixo do valor de referência de -25 a 25 mV para a estabilidade do sistema

coloidal (nanoComposix, 2012). Isto poderá estar associado à atividade coloidal das argilas (argila pouco ativa) e, conseqüentemente, com a mineralogia do solo documento (ilite). Este valor de potencial elétrico poderá ser associado ao elevado limite de liquidez ($W_L = 42,55\%$), já que um baixo potencial elétrico conduz à agregação das partículas argilosas e, conseqüentemente, à floculação das partículas. Esta floculação das partículas não influencia o ensaio de sedimentação, já que é utilizado um desfloculante com o propósito de evitar a interferência de fatores como este para a determinação da granulometria da fração fina dos solos.

Ainda relativamente ao potencial elétrico os solos IN_2 e ML_K (-37,15 a 31,57 mV e -30,89 a 29,83 mV para meio alcalino, respetivamente), este encontra-se acima do intervalo de referência -25 a 25 mV, portanto, pode-se considerar que estes solos estão em equilíbrio coloidal. É de notar que a atividade coloidal dos dois solos é concordante (argilas muito ativas).

- O ensaio de equivalente de areia apenas tem resultados aproximados ao real teor de areia e cascalho quando os solos têm uma reduzida fração de material silto argiloso (os solos PT_G e IN_1 têm, respetivamente, uma fração $< 0,06$ mm, de 81% e 93%, enquanto que os valores de E.A. são 79,3% e 93,3%). Quando os solos têm uma maior fração de material fino, os resultados do ensaio de equivalente de areia são bastante mais díspares (os solos PT_x , IN_2 e ML_K têm, respetivamente, uma fração $< 0,06$ mm de 43%, 46% e 73%, enquanto que os valores de E.A. são 22,1%, 30,2% e 39,5%).
- Pelo ensaio de azul de metileno verificou-se uma grande desigualdade em relação aos valores do solo PT_x e as demais amostras. Isto vai de encontro ao que a bibliografia refere relativamente à área específica das argilas. Devido a esta elevada quantidade de argilas, o solo tem uma elevada área específica. Esta área específica maior faz com que o corante azul de metileno tenha uma maior superfície das partículas para recobrir (Hang & Brindley, 1970).

CONCLUSÕES

6. CONCLUSÕES

É difícil o relacionamento dos dados calculados em laboratório com a estabilização de solos no contexto da construção de fundações profundas, já que a bibliografia pouco refere o comportamento direto da estabilidade em escavação de fundação profunda com recurso a polímeros. Normalmente estes compostos são patenteados pelos fabricantes, e portanto é natural que haja muito pouca informação técnica sobre os mecanismos de funcionamento destes produtos.

No entanto, é possível associar que os solos siltosos e argilosos apresentam uma melhor resposta à estabilização por polímeros, portanto para os solos PT_G (areia siltosa), IN₂ (areia argilosa), ML_K (areia siltosa) e em particular o solo PT_x (argila magra), esta pode ser uma solução bastante viável.

O intervalo de potencial elétrico do solo PT_x, mesmo no seu valor máximo, encontra-se abaixo do intervalo de referência de -25 a 25 mV para a estabilidade do sistema coloidal. Isto poderá significar que este solo apresenta uma baixa estabilidade natural quando não é efetuado nenhum tipo de tratamento. Portanto este solo poderá ser um forte candidato à utilização de estabilização através de polímeros. Quanto aos outros solos, IN₂ e ML_K, estes já se encontram acima do limite mínimo para a estabilidade do sistema coloidal, no entanto isto apenas ocorre em meio alcalino. Por isso, se por alguma razão o pH *in situ* não estiver no espetro alcalino, estes solos também necessitarão de estabilização por meio de polímeros.

Os solos com excesso de sais (i.e. condutividade elétrica elevada) mantêm as argilas num estado floculado, de modo a que normalmente são considerados como tendo propriedades físicas favoráveis. O solo PT_G apresenta uma condutividade elétrica bastante reduzida em comparação com os demais solos, pelo que isto poderá significar que é necessária a utilização de um método de estabilização.

É também importante lembrar que a utilização de polímeros apenas é eficaz no que diz respeito à estabilização de solos abaixo do nível freático, pelo que mesmo que um determinado solo tenha características que viabilizam a utilização deste método, o seu uso pode acabar por não ser possível devido às condicionantes *in situ*.

A relação da estabilidade do solo com parâmetros como a mineralogia e os limites de plasticidade teria de ser realizada com a comparação de ensaios e observações do comportamento do solo em situações de obra. Desse modo, seriam melhor delineados os fatores que influenciam cada parâmetro. Fortuitamente, todos os solos analisados tinham uma composição mineralógica

diferente, pelo que é difícil avaliar as interações entre alguns dos parâmetros estudados, sendo que o número de variáveis é elevado.

PERSPETIVAS FUTURAS

Em futuras explorações do tema, seria proveitoso analisar um maior número de solos, de modo a formar uma documentação mais extensiva da maneira como as diferentes propriedades interagem entre si. Idealmente, seriam usadas amostras de diferentes composições granulométricas para cada tipo de solo diferente.

Também seria útil a realização de ensaios laboratoriais de permeabilidade, uma vez que a abordagem empírica apenas parece ser adequada para determinar a grandeza aproximada deste parâmetro.

A eficácia de materiais de estabilização em solos é muitas vezes determinada através de ensaios de resistência à compressão não confinada, pelo que este ensaio seria ideal para determinar o comportamento base de cada solo quando é utilizado polímero para a sua estabilização.

De modo a avaliar de forma mais objetiva o comportamento de diferentes tipos de solo num contexto da estabilização relativamente à construção de fundações profundas, seria bom, no futuro, associar este trabalho laboratorial à descrição do comportamento em obra do mesmo, já que foram utilizados solos recolhidos em obras internacionais e solos em armazém de origem desconhecida, é difícil associar a parca bibliografia disponível relativamente a fatores que influenciam a estabilização de solos com recurso a fluídos poliméricos aos resultados dos ensaios.

BIBLIOGRAFIA

- Abrol, I., Yadav, J., & Massoud, F. (1988). Saline Soils and their management. Em *Salt-Affected Soils and their Management*. Roma: Food and agriculture organization of the United States.
- Alyamani, M. S., & Şen, Z. (Julho de 1993). Determination of Hydraulic Conductivity from Complete Grain-Size Distribution Curves. *Groundwater Vol. 31 Iss. 4*, pp. 551-555.
- ASTM. (1985). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes . *Classification of Soils for Engineering Purposes: Annual Book of ASTM Standards*, pp. 395 – 408.
- Atterberg, A. (1911). On the investigation of the physical properties of soils and on the plasticity of clays. *Internationale Mitteilungen für Bodenkunde 1*, pp. 10-45.
- Brookhaven Instruments Corporation. (19 de Agosto de 2016). *Zeta Potential Applications*. Obtido de Brookhaven Instruments Corporation: <http://www.bic.com/literature/library/zeta-potential-applications>
- Campbell, D. J. (2001). Liquid and plastic limits. Em K. A. Smith, *Mullins CE (eds.), Soil and Environmental Analysis, Physical Methods* (pp. 349-375). Nova York: Dekker Inc.
- Carroll, D. (1970). *Clay Minerals: A Guide to Their X-ray Identification*. Geological Society of America.
- de la Rosa. (1979). Relation of several pedological characteristics to engineering qualities of soil. *Journal of Soil Science 30*, pp. 793-799.
- DeGroot, D., Ostendorf, D., & Judge, A. (2012). *In situ* measurement of hydraulic conductivity of saturated soils. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, Vol. 43, No. 4*, pp. 63-72.
- Eastern Illinois University. (24 de Novembro de 2016). *Mechanical and Chemical Weathering*. Obtido de <http://www.ux1.eiu.edu/~cfjps/1300/weathering.html>
- El-Swaify, S. A. (2000). Soil and Water Salinity. Em J. A. Uchida, *Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils, Approaches for Tropical and Subtropical Agriculture*. College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii at Manoa.
- Encyclopaedia Britannica. (30 de Agosto de 2016). *Clay Mineral*. Obtido de Encyclopaedia Britannica: <https://www.britannica.com/science/clay-mineral>
- Feitosa, F. A., & Filho, J. M. (2000). *Hidrogeologia - conceitos e aplicações*. CPRM - Serviço Geológico do Brasil.
- Fernandes, M. M. (2011). *Mecânica dos Solos - Conceitos e Princípios Fundamentais*. Porto: FEUP edições.
- Gidigas, M. (1976). *Laterite Soil Engineering: Pedogenesis and Engineering Principles*. Amsterdão: Elsevier.
- Gillot, J. (1968). *Clay in Engineering Geology*. Amsterdão: Elsevier.

- Hang, P. T., & Brindley, G. W. (Novembro de 1970). Methylene Blue Absorption by Clay Minerals. Determination of Surface Areas and Cation Exchange Capacities . *Clay and clay minerals*, Vol. 18 Iss. 4, pp. 203 - 217.
- Harris, W., & White, N. (2008). *X-ray Diffraction Techniques for Soil Mineral Identification*.
- Ingles, O. C., & Lim, N. (1980). Accelerated laterization. A new method for clay stabilization. *proceedings of the 7th Conference*. Australian Clay Minerals Society.
- Katz, L., Rauch, A., Liljestrand, H., Albers, H., Shaw, K., & Albers, H. (2001). *Mechanisms of Soil Stabilization with Liquid Ionic Stabilizer*.
- Larsson, M., Hill, A., & Duffy, J. (2012). Suspension Stability; Why Particle Size, Zeta Potential and Rheology are Important. *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, vol. 20, (pp. 209 - 214).
- Lima, R. M., & Luz, J. A. (2001). Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Lei de Stokes. *Revista Escola de Minas*.
- LNEC. (1966). *Especificação E 196-1966, Solos - Análise granulométrica*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Loveland, P. J., & Whalley, W. R. (2001). Particle Size Analysis. Em K. A. Smith, *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods, Revised, and Expanded* (pp. 281-313).
- Manceau, A., Marcus, M. A., & Tamura, N. (2002). *Quantitative Speciation of Heavy Metals in Soils and Sediments by Synchrotron X-ray Techniques*. Mineral Soc America.
- McBride, R. A. (2008). Soil consistency and lower plastic limits. . Em M. R. Carter, & E. G. Gregorich, *Sampling and Methods of Analysis* (pp. 761-769). CRC Press.
- Mitchell, J. K. (1986). Practical Problems from Surprising Soil Behavior. Em *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 112, No. 3 (pp. 259-289). American Society of Civil Engineers.
- Mitchell, J. K., & Dermatas, D. (1992). Clay soil heave caused by lime-sulfate reactions. Em *STP 1135, Innovations and Uses for Lime* (pp. 41-64). Filadélfia: ASTM.
- Moore, D., & R.C. Reynolds, J. (1997). *X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. Nova York: Oxford Univ. Press.
- nanoComposix. (2012). *Zeta Potential Analysis of Nanoparticles*. San Diego.
- Newman, K., & Tingle, J. S. (2004). Emulsion Polymers for Soil Stabilization. *FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference*. Atlantic City, New Jersey.
- Osinubi, K. J., & Eberemu, A. O. (2009). Bagasse Ash Stabilization of Lateritic Soil. Em E. K. Yanful, *Appropriate Technologies for Environmental Protection in the Developing World* (p. 272). Ed. Springer Science + Business Media B. V.
- Petkovšek, A., Maček, M., Pavšič, P., & Bohar, F. (Novembro de 2010). Fines characterization through the methylene blue and sand equivalent test: comparison with other experimental

- techniques and application of criteria to the aggregate quality assessment. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Iss. 4, pp. 561 - 574.
- Rhoades, J. D., Manteghi, N. A., Shouse, P. J., & Alves, W. J. (1989). Estimating Soil Salinity from Saturated Soil-Paste Electrical Conductivity. *Soil Science Society of America* 53, 428-433.
- Salas, J., & Alpañes, J. (1971). *Geotecnia y cimientos I. Propiedades de los suelos y de las rocas*. Segovia, Espanha: Librería Torreón de Rueda.
- Santoni, R., Tingle, J., & Webster, S. (2003). Stabilization of Silty Sand with Non-traditional Additives. *Transportation Research Record 1787* (pp. 33-41). Washington, DC: National Research Council.
- Scholen, D. E. (1992). *Non-Standard Stabilizers*. Washington, D.C.: FHWA, U.S. Department of Transportation.
- Scott, R. F., & Schoustra, J. J. (1968). *Soil mechanics and Engineering*. Nova York: Mc Graw-Hill.
- Sezer, A., Göktepe, A., & Altun, S. (2009). Estimation of the permeability of granular soils using neuro-fuzzy system. *AIAI - Workshop Proceedings*.
- Skempton, A. (1953). The Colloidal "Activity" of Clays. *Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (pp. 57-61).
- Spínola, S. (2015). *Caracterização térmica de pedras naturais*. Aveiro: Universidade de Aveiro.
- State Water Resources Control Board Division of California. (09 de Setembro de 2016). *Groundwater information sheet - Salinity*. Obtido de http://www.waterboards.ca.gov/gama/docs/coc_salinity.pdf
- Tarrer, A., & Wagh, V. (1991). *The Effect of the Physical and Chemical Characteristics of the Aggregate on Bonding*. Washington, D.C.: Strategic Highway Research Program.
- University of Hawaii at Mānoa. (24 de Outubro de 2016). *Soil Texture and Soil Structure*. Obtido de http://www.ctahr.hawaii.edu/mauisoil/a_factor_ts.aspx
- WES. (1977). *Materials Evaluated as Potential Soil Stabilizers*. Vicksburg, Miss.: U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station.
- Winterkorn, H. F., & Pamukcu, S. (1974). Soil Stabilization and Grouting. Em H.-Y. Fang, *Foundation Engineering Handbook* (pp. 317-378). Springer.
- Yukselen, Y., & Kaya, A. (2008). Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils. *Engineering Geology*, 38-45.
- Zolfaghari, Z., & Mosaddeghi, M. R. (Novembro de 2015). Soil atterberg limits and consistency indices as influenced by land use and slope position in Western Iran. *Journal of Mountain Science*, pp. 1471-1483.

ANEXOS

ANEXO I – CÁLCULOS PARA ENSAIO GRANULOMÉTRICO POR PENEIRAÇÃO HÚMIDA

		MASSA RETIDA (g)				
		PT _x	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _k
MASSA INICIAL (g)		500,0	500,0	500,0	500,0	500,0
ABERTURA PENEIRO > 2 mm	76,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	50,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	38,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	25,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	9,51	13,1	0,0	0,0	15,9	14,3
	4,76	7,1	0,87	4,2	7,5	28,4
	2	12,9	17,3	3,6	4,4	66,3
MASSA INICIAL (g)		59,7	58,6	87,5	58,8	100,0
ABERTURA PENEIRO < 2 mm	0,841	9,2	12,9	1,56	0,6	22,8
	0,42	4,0	14,2	5,46	0,5	13,1
	0,25	3,4	8,5	37,98	0,6	10,1
	0,105	5,4	8,9	35,3	7,2	11,4
	0,074	1,2	1,9	3,18	11,5	4,0

ABERTURA PENEIRO (mm)	MASSA PASSADA PONDERADA (g)				
	PT _x	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _k
76,1	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0
50,8	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0
38,1	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0
25,4	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0
19	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0
9,51	486,9	500,0	500,0	484,1	485,7
4,76	479,8	499,1	495,8	476,6	457,3
2	466,9	481,8	492,2	472,2	391,0
0,841	50,5	45,7	85,9	58,2	77,2
0,42	46,5	31,5	80,5	57,7	64,1
0,25	43,1	23,0	42,5	57,1	54,0
0,105	37,7	14,1	7,2	49,9	42,6
0,074	36,5	12,2	4,0	38,4	38,6

ABERTURA PENEIRO (mm)	MASSA PASSADA PONDERADA (%)				
	PT _x	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _K
76,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
38,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
19	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
9,51	97,4	100,0	100,0	96,8	97,1
4,76	96,0	99,8	99,2	95,3	91,5
2	93,4	96,4	98,4	94,4	78,2
0,841	79,0	75,2	96,7	93,5	60,4
0,42	72,7	51,8	90,5	92,7	50,1
0,25	67,4	37,8	47,8	91,7	42,2
0,105	59,0	23,2	8,1	80,1	33,3
0,074	57,1	20,1	4,5	61,7	30,2

ANEXO II – CÁLCULOS PARA ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO

T (MIN)		PT _x	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _K
1	Ls	1,021	1,006	1,003	1,012	1,011
	T (°C)	27	27	27	27	27
2	Ls	1,02	1,005	1,002	1,01	1,01
	T (°C)	27	27	27	27	27
5	Ls	1,019	1,005	1,002	1,008	1,008
	T (°C)	27	27	27	27	27
15	Ls	1,019	1,004	1,002	1,006	1,006
	T (°C)	27	27	27	27	27
30	Ls	1,018	1,003	1,002	1,006	1,005
	T (°C)	27	27	27	27	27
60	Ls	1,018	1,003	1,001	1,005	1,005
	T (°C)	27	27	27	27	27
250	Ls	1,017	1,002	1,001	1,004	1,003
	T (°C)	27	27	27	27	27
1440	Ls	1,016	1,002	1,001	1,003	1,003
	T (°C)	27	27	27	27	27
2880	Ls	1,016	1,001	1,001	1,003	1,002
	T (°C)	27	27	27	27	27

CORREÇÃO DE ANTIFLOCULANTE	La	0,9965
	T	27
	Cr	0,01256
	Ca	0,00906
CORREÇÃO DE TEMPERATURA	Ct	0,0015
CORREÇÃO DO MENISCO	Cm	0,0012

PESO VOLÚMICO (g/cm³)	A (cm²)	D (cm)	h_s (cm)	H_s (cm)	h (cm)	Z_s (cm)
1,035	2,71	0	0,005	0,005	13,5	4,908
1,030			0,010	0,010		4,913
1,025			0,015	0,015		4,918
1,020			0,020	0,020		4,923
1,015			0,025	0,025		4,928
1,010			0,030	0,030		4,933
1,005			0,035	0,035		4,938
1,000			0,040	0,040		4,943
0,995			0,045	0,045		4,948

t (min)	L_c (g/cm³)				
	PT_x	PT_G	IN₁	IN₂	ML_k
1	1,0146	0,9996	0,9966	1,0056	1,0046
2	1,0136	0,9986	0,9956	1,0036	1,0036
5	1,0126	0,9986	0,9956	1,0016	1,0016
15	1,0126	0,9976	0,9956	0,9996	0,9996
30	1,0116	0,9966	0,9956	0,9996	0,9986
60	1,0116	0,9966	0,9946	0,9986	0,9986
250	1,0106	0,9956	0,9946	0,9976	0,9966
1440	1,0096	0,9956	0,9946	0,9966	0,9966
2880	1,0096	0,9946	0,9946	0,9966	0,9956

t (min)	n _D (%)				
	PT _x	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _K
1	86,9489	70,8447	108,0211	44,0844	41,6504
2	82,8085	59,0373	72,0141	36,7370	37,8640
5	78,6681	59,0373	72,0141	29,3896	30,2912
15	78,6681	47,2298	72,0141	22,0422	22,7184
30	74,5276	35,4224	72,0141	22,0422	18,9320
60	74,5276	35,4224	36,0070	18,3685	18,9320
250	70,3872	23,6149	36,0070	14,6948	11,3592
1440	66,2468	23,6149	36,0070	11,0211	11,3592
2880	66,2468	11,8075	36,0070	11,0211	7,5728

t (min)	N _D (%)				
	PT _x	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _K
1	49,6384	14,2133	4,8854	27,1891	12,5723
2	47,2747	11,8444	3,2569	22,6576	11,4293
5	44,9110	11,8444	3,2569	18,1261	9,1435
15	44,9110	9,4755	3,2569	13,5945	6,8576
30	42,5472	7,1066	3,2569	13,5945	5,7147
60	42,5472	7,1066	1,6285	11,3288	5,7147
250	40,1835	4,7378	1,6285	9,0630	3,4288
1440	37,8198	4,7378	1,6285	6,7973	3,4288
2880	37,8198	2,3689	1,6285	6,7973	2,2859

t (min)	D (μm)				
	PT _x	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _K
1	30,39	30,44	30,45	30,42	30,43
2	21,49	21,53	21,53	21,52	21,52
5	13,60	13,61	13,62	13,61	13,61
15	7,85	7,86	7,86	7,86	7,86
30	5,55	5,56	5,56	5,56	5,56
60	3,93	3,93	3,93	3,93	3,93
250	1,92	1,93	1,93	1,93	1,93
1440	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80

ANEXO III– CÁLCULOS DA CURVA GRANULOMÉTRICA A PARTIR DOS ENSAIOS DE PENEIRAÇÃO HÚMIDA E SEDIMENTAÇÃO AGREGADOS

	DIMENSÃO (MM)	PT_x	PT_G	IN₁	IN₂	ML_k
PENEIRAÇÃO	76,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	50,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	38,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	19	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	9,51	97,4	100,0	100,0	96,8	97,1
	4,76	96,0	99,8	99,2	95,3	91,5
	2	93,4	96,4	98,4	94,4	78,2
	0,841	79,0	75,2	96,7	93,5	60,4
	0,42	72,7	51,8	90,5	92,7	50,1
	0,25	67,4	37,8	47,8	91,7	42,2
	0,105	59,0	23,2	10,4	80,1	33,3
	0,074	57,1	20,1	6,8	61,7	30,2
SEDIMENTAÇÃO	0,03	49,6	14,2	4,9	27,2	12,6
	0,021	47,3	11,8	3,3	22,7	11,4
	0,013	44,9	11,8	3,3	18,1	9,1
	0,007	44,9	9,5	3,3	13,6	6,9
	0,005	42,5	7,1	3,3	13,6	5,7
	0,003	42,5	7,1	1,6	11,3	5,7
	0,002	40,2	4,7	1,6	9,1	3,4
	0,001	37,8	4,7	1,6	6,8	3,4
	0,0005	37,8	2,4	1,6	6,8	2,3

ANEXO IV – CÁLCULOS PARA ENSAIO ANÁLISE QUÍMICA QUANTITATIVA POR ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

CONCENTRAÇÃO DOS ELEMENTOS (%)									
ELEMENTO	PT_X(1)			PT_X(2)			PT_G(1)		
Ag	0,003	0,003	0,002	0,005	0,002	0	0	0	0
As	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004	0,001	0,001	0,001
Au	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ba	0,02	0,021	0,021	0,025	0,019	0,023	0	0	0
Ca	0,548	0,487	0,519	0,52	0,55	0,511	0,193	0,192	0,191
Cd	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Co	0,011	0,013	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0,014	0,014	0,014	0,01	0,008	0,012	0	0	0
Cs	0	0	0,001	0,002	0	0	0	0	0
Cu	0,003	0,003	0,002	0,003	0,003	0,003	0,001	0,001	0,001
Fe	5,383	5,313	5,425	5,438	5,408	5,41	0,908	0,924	0,808
H	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K	2,111	2,079	2,178	2,135	2,141	2,11	2,445	2,5	2,374
Mn	0,065	0,061	0,064	0,063	0,059	0,061	0,015	0,013	0,011
Mo	0	0	0	0	0	0	0,001	0,001	0,001
Ni	0,008	0,009	0,01	0,008	0,009	0,011	0	0	0
Pb	0	0	0	0	0	0	0,004	0,004	0,004
Pd	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rb	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,017	0,018	0,016
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sb	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sc	0,007	0,007	0,004	0,005	0	0,005	0	0	0,002
Se	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sn	0	0	0,002	0	0	0	0	0	0
Sr	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
Te	0	0	0	0,003	0	0	0	0	0
Th	0	0	0	0	0	0	0,001	0,001	0,001
Ti	0,772	0,737	0,777	0,805	0,805	0,773	0,122	0,122	0,117
U	0	0	0	0	0,001	0	0,002	0,003	0,003
V	0,023	0,024	0,026	0,022	0,024	0,02	0	0	0,003
W	0	0	0	0	0,002	0	0	0	0
Zn	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,009	0,01	0,009
Zr	0,037	0,035	0,034	0,036	0,042	0,042	0,011	0,013	0,011

CONCENTRAÇÃO DOS ELEMENTOS (%)									
ELEMENTO	PT _G (2)			IN ₁ (1)			IN ₁ (2)		
	Ag	0	0	0	0,001	0,002	0,002	0,001	0
As	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Au	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ba	0	0	0	0,03	0,037	0,037	0,036	0,035	0,035
Ca	0,179	0,174	0,169	1,947	1,879	1,932	1,905	1,909	1,981
Cd	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Co	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cs	0	0	0	0	0,002	0,002	0	0,001	0,001
Cu	0,001	0	0,001	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001
Fe	0,768	0,78	0,763	2,09	2,08	2,045	2,124	2,139	2,106
H	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K	2,381	2,423	2,44	2,694	2,521	2,64	2,756	2,762	2,78
Mn	0,012	0,014	0,013	0,05	0,045	0,047	0,05	0,05	0,048
Mo	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ni	0	0	0	0,005	0,006	0,006	0,004	0,004	0,006
Pb	0,004	0,004	0,004	0	0	0	0	0	0
Pd	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rb	0,018	0,017	0,017	0,011	0,011	0,011	0,012	0,012	0,012
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sb	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0
Sc	0	0	0,002	0,007	0	0	0	0,01	0,007
Se	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sn	0	0	0	0,002	0	0,002	0	0,002	0
Sr	0,006	0,006	0,006	0,011	0,011	0,01	0,011	0,011	0,01
Te	0	0	0	0	0,003	0	0	0	0
Th	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002
Ti	0,121	0,116	0,127	0,386	0,345	0,347	0,399	0,384	0,385
U	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
V	0	0	0	0,006	0,009	0,011	0,009	0,011	0,013
W	0	0	0	0,002	0	0,002	0	0	0
Zn	0,008	0,009	0,008	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,004
Zr	0,013	0,013	0,015	0,038	0,038	0,04	0,038	0,038	0,039

CONCENTRAÇÃO DOS ELEMENTOS (%)												
ELEMENTO	IN ₂ (1)			IN ₂ (2)			ML _k (1)			ML _k (2)		
	Ag	0,003	0,003	0,003	0,004	0,005	0,004	0	0	0	0	0
As	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,008	0,007	0,008	0,008	0,007	0,008
Au	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ba	0,039	0,04	0,041	0,041	0,044	0,045	0	0,012	0,013	0	0	0
Ca	1,274	1,266	1,218	1,21	1,264	1,299	8,04	8,434	8,455	8,234	8,058	8,191
Cd	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Co	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0	0	0	0	0	0,004	0,005	0,005	0,007	0,005	0,005	0
Cs	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0	0	0	0	0	0
Cu	0,001	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,005	0,004	0,004
Fe	1,871	1,864	1,852	1,886	1,933	1,892	1,66	1,632	1,634	1,646	1,711	1,703
H	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0	0	0
K	2,076	2,037	2,014	2,044	2,128	2,049	1,724	1,793	1,808	1,785	1,754	1,792
Mn	0,037	0,037	0,037	0,04	0,036	0,04	0,033	0,031	0,032	0,03	0,031	0,029
Mo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ni	0,006	0,005	0,005	0,007	0,005	0,005	0,006	0,006	0,007	0,005	0,004	0,005
Pb	0	0	0	0	0	0	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Pd	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rb	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
S	0	0	0	0	0	0	0,04	0,059	0,039	0,04	0,063	0,055
Sb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sc	0	0,005	0,006	0	0,006	0,006	0,023	0,02	0,021	0,022	0,013	0,017
Se	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sn	0,002	0,002	0	0	0,002	0,002	0,008	0,017	0,018	0,01	0,007	0,008
Sr	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
Te	0,003	0,002	0	0	0,004	0,003	0	0	0	0	0	0
Th	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Ti	0,368	0,367	0,36	0,379	0,397	0,398	0,308	0,333	0,334	0,326	0,326	0,334
U	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004
V	0,009	0,01	0,01	0,008	0,011	0,009	0,011	0,012	0,011	0,011	0,008	0,01
W	0	0,003	0	0	0	0,003	0,004	0,004	0,003	0,003	0,004	0,003
Zn	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,028	0,027	0,026	0,028	0,028	0,028
Zr	0,035	0,036	0,035	0,036	0,038	0,037	0,031	0,039	0,039	0,043	0,041	0,041

CONVERSÃO DOS ELEMENTOS PARA ÓXIDOS (%)							
ELEMENTO	ÓXIDO	PT _{x(1)}			PT _{x(2)}		
Ag	Ag ₂ O	0,003222	0,003222	0,002148	0,005371	0,002148	0
As	As ₂ O ₃	0,005281	0,005281	0,003961	0,005281	0,005281	0,005281
	As ₂ O ₅	0,006136	0,006136	0,004602	0,006136	0,006136	0,006136
Ba	BaO	0,02233	0,023447	0,023447	0,027913	0,021214	0,02568
Ca	CaO	0,766762	0,68141	0,726185	0,727584	0,76956	0,714991
Cr	Cr ₂ O ₃	0,020461	0,020461	0,020461	0,014615	0,011692	0,017538
Cs	Cs ₂ O	0	0	0,00106	0,00212	0	0
Cu	CuO	0,003755	0,003755	0,002504	0,003755	0,003755	0,003755
Fe	FeO	6,92523	6,835175	6,979263	6,995987	6,957392	6,959965
	Fe ₂ O ₃	7,696075	7,595996	7,756123	7,774709	7,731818	7,734677
K	K ₂ O	2,542911	2,504363	2,623619	2,571821	2,579049	2,541706
Mn	MnO	0,083928	0,078763	0,082637	0,081346	0,076181	0,078763
Ni	NiO	0,01018	0,011453	0,012725	0,01018	0,011453	0,013998
Pb	PbO	0	0	0	0	0	0
Pd	PdO	0	0	0	0	0	0
Rb	Rb ₂ O	0,009842	0,009842	0,009842	0,009842	0,009842	0,009842
S	SO ₃	0	0	0	0	0	0
Sb	Sb ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0
	Sb ₂ O ₅	0	0	0	0	0	0
Sc	Sc ₂ O ₃	0,010737	0,010737	0,006135	0,007669	0	0,007669
Sn	SnO ₂	0	0	0,002539	0	0	0
	SnO	0	0	0,00227	0	0	0
Sr	SrO	0,007096	0,007096	0,007096	0,007096	0,007096	0,007096
Te	TeO ₃	0	0	0	0,004129	0	0
Th	ThO ₂	0	0	0	0	0	0
	ThO	0	0	0	0	0	0
Ti	TiO ₂	1,287773	1,22939	1,296114	1,342821	1,342821	1,289441
U	UO ₂	0	0	0	0	0,001134	0
	UO ₃	0	0	0	0	0,001202	0
	U ₃ O ₈	0	0	0	0	0,001179	0
V	V ₂ O ₅	0,04106	0,042845	0,046415	0,039274	0,042845	0,035704
W	WO ₃	0	0	0	0	0,002522	0
Zn	ZnO	0,001245	0,001245	0,001245	0,001245	0,001245	0,001245
Zr	ZrO ₂	0,04998	0,047278	0,045927	0,048629	0,056734	0,056734

CONVERSÃO DOS ELEMENTOS PARA ÓXIDOS (%)							
ELEMENTO	ÓXIDO	PT _{G(1)}			PT _{G(2)}		
Ag	Ag ₂ O	0	0	0	0	0	0
As	As ₂ O ₃	0,00132	0,00132	0,00132	0,00132	0,00132	0,00132
	As ₂ O ₅	0,001534	0,001534	0,001534	0,001534	0,001534	0,001534
Ba	BaO	0	0	0	0	0	0
Ca	CaO	0,270046	0,268646	0,267247	0,250457	0,243461	0,236465
Cr	Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0
Cs	Cs ₂ O	0	0	0	0	0	0
Cu	CuO	0,001252	0,001252	0,001252	0,001252	0	0,001252
Fe	FeO	1,168142	1,188726	1,039492	0,988032	1,00347	0,9816
	Fe ₂ O ₃	1,298168	1,321043	1,155198	1,09801	1,115166	1,090861
K	K ₂ O	2,945247	3,0115	2,85972	2,868153	2,918746	2,939224
Mn	MnO	0,019368	0,016786	0,014203	0,015494	0,018077	0,016786
Ni	NiO	0	0	0	0	0	0
Pb	PbO	0,004618	0,004618	0,004618	0,004618	0,004618	0,004618
Pd	PdO	0,004602	0,004602	0,004602	0,004602	0,004602	0,004602
Rb	Rb ₂ O	0,018591	0,019685	0,017498	0,019685	0,018591	0,018591
S	SO ₃	0	0	0	0	0	0
Sb	Sb ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0
	Sb ₂ O ₅	0	0	0	0	0	0
Sc	Sc ₂ O ₃	0	0	0,003068	0	0	0,003068
Sn	SnO ₂	0	0	0	0	0	0
	SnO	0	0	0	0	0	0
Sr	SrO	0,007096	0,007096	0,007096	0,007096	0,007096	0,007096
Te	TeO ₃	0	0	0	0	0	0
Th	ThO ₂	0,001069	0,001069	0,001069	0,001069	0,001069	0,001069
	ThO	0,001138	0,001138	0,001138	0,001138	0,001138	0,001138
Ti	TiO ₂	0,203508	0,203508	0,195168	0,20184	0,1935	0,211849
U	UO ₂	0,002269	0,003403	0,003403	0,002269	0,002269	0,002269
	UO ₃	0,002403	0,003605	0,003605	0,002403	0,002403	0,002403
	U ₃ O ₈	0,002358	0,003538	0,003538	0,002358	0,002358	0,002358
V	V ₂ O ₅	0	0	0,005356	0	0	0
W	WO ₃	0	0	0	0	0	0
Zn	ZnO	0,011203	0,012448	0,011203	0,009958	0,011203	0,009958
Zr	ZrO ₂	0,014859	0,01756	0,014859	0,01756	0,01756	0,020262

CONVERSÃO DOS ELEMENTOS PARA ÓXIDOS (%)							
ELEMENTO	ÓXIDO	IN ₁₍₁₎			IN ₁₍₂₎		
Ag	Ag ₂ O	0,001074	0,002148	0,002148	0,001074	0	0
As	As ₂ O ₃	0,002641	0,002641	0,002641	0,002641	0,002641	0,002641
	As ₂ O ₅	0,003068	0,003068	0,003068	0,003068	0,003068	0,003068
Ba	BaO	0,033495	0,041311	0,041311	0,040194	0,039078	0,039078
Ca	CaO	2,724242	2,629097	2,703254	2,665476	2,671073	2,771815
Cr	Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0
Cs	Cs ₂ O	0	0,00212	0,00212	0	0,00106	0,00106
Cu	CuO	0,001252	0,002504	0,001252	0,002504	0,001252	0,001252
Fe	FeO	2,688785	2,67592	2,630893	2,732526	2,751824	2,709369
	Fe ₂ O ₃	2,988073	2,973776	2,923737	3,036683	3,058128	3,010948
K	K ₂ O	3,245192	3,036797	3,180144	3,319878	3,327105	3,348788
Mn	MnO	0,06456	0,058104	0,060686	0,06456	0,06456	0,061978
Ni	NiO	0,006363	0,007635	0,007635	0,00509	0,00509	0,007635
Pb	PbO	0	0	0	0	0	0
Pd	PdO	0	0	0	0	0	0
Rb	Rb ₂ O	0,01203	0,01203	0,01203	0,013123	0,013123	0,013123
S	SO ₃	0	0	0	0	0	0
Sb	Sb ₂ O ₃	0	0	0	0	0,002394	0
	Sb ₂ O ₅	0	0	0	0	0,002657	0
Sc	Sc ₂ O ₃	0,010737	0	0	0	0,015338	0,010737
Sn	SnO ₂	0,002539	0	0,002539	0	0,002539	0
	SnO	0,00227	0	0,00227	0	0,00227	0
Sr	SrO	0,013009	0,013009	0,011826	0,013009	0,013009	0,011826
Te	TeO ₃	0	0,004129	0	0	0	0
Th	ThO ₂	0,001069	0,002138	0,001069	0,002138	0,002138	0,002138
	ThO	0,001138	0,002276	0,001138	0,002276	0,002276	0,002276
Ti	TiO ₂	0,643887	0,575495	0,578831	0,665572	0,64055	0,642219
U	UO ₂	0,001134	0,001134	0,001134	0,001134	0,001134	0,001134
	UO ₃	0,001202	0,001202	0,001202	0,001202	0,001202	0,001202
	U ₃ O ₈	0,001179	0,001179	0,001179	0,001179	0,001179	0,001179
V	V ₂ O ₅	0,010711	0,016067	0,019637	0,016067	0,019637	0,023208
W	WO ₃	0,002522	0	0,002522	0	0	0
Zn	ZnO	0,004979	0,004979	0,004979	0,004979	0,003734	0,004979
Zr	ZrO ₂	0,05133	0,05133	0,054032	0,05133	0,05133	0,052681

CONVERSÃO DOS ELEMENTOS PARA ÓXIDOS (%)							
ELEMENTO	ÓXIDO	IN ₂₍₁₎			IN ₂₍₂₎		
Ag	Ag ₂ O	0,003222	0,003222	0,003222	0,004296	0,005371	0,004296
As	As ₂ O ₃	0,00132	0,00132	0,00132	0,00132	0,00132	0,00132
	As ₂ O ₅	0,001534	0,001534	0,001534	0,001534	0,001534	0,001534
Ba	BaO	0,043544	0,04466	0,045777	0,045777	0,049126	0,050243
Ca	CaO	1,782581	1,771387	1,704226	1,693032	1,768589	1,817561
Cr	Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0,005846
Cs	Cs ₂ O	0,00212	0,00212	0,00212	0,00212	0,003181	0,003181
Cu	CuO	0,001252	0,002504	0,001252	0,002504	0,002504	0,002504
Fe	FeO	2,407042	2,398036	2,382598	2,426339	2,486805	2,434058
	Fe ₂ O ₃	2,674969	2,664961	2,647804	2,696414	2,76361	2,704992
K	K ₂ O	2,50075	2,45377	2,426064	2,462202	2,563389	2,468225
Mn	MnO	0,047774	0,047774	0,047774	0,051648	0,046483	0,051648
Ni	NiO	0,007635	0,006363	0,006363	0,008908	0,006363	0,006363
Pb	PbO	0	0	0	0	0	0
Pd	PdO	0	0	0	0	0	0
Rb	Rb ₂ O	0,009842	0,009842	0,009842	0,009842	0,009842	0,009842
S	SO ₃	0	0	0	0	0	0
Sb	Sb ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0
	Sb ₂ O ₅	0	0	0	0	0	0
Sc	Sc ₂ O ₃	0	0,007669	0,009203	0	0,009203	0,009203
Sn	SnO ₂	0,002539	0,002539	0	0	0,002539	0,002539
	SnO	0,00227	0,00227	0	0	0,00227	0,00227
Sr	SrO	0,014191	0,014191	0,014191	0,014191	0,014191	0,014191
Te	TeO ₃	0,004129	0,002752	0	0	0,005505	0,004129
Th	ThO ₂	0,001069	0,002138	0,002138	0,001069	0,001069	0,002138
	ThO	0,001138	0,002276	0,002276	0,001138	0,001138	0,002276
Ti	TiO ₂	0,613861	0,612193	0,600516	0,63221	0,662236	0,663904
U	UO ₂	0,001134	0,001134	0,001134	0,001134	0,001134	0,001134
	UO ₃	0,001202	0,001202	0,001202	0,001202	0,001202	0,001202
	U ₃ O ₈	0,001179	0,001179	0,001179	0,001179	0,001179	0,001179
V	V ₂ O ₅	0,016067	0,017852	0,017852	0,014282	0,019637	0,016067
W	WO ₃	0	0,003783	0	0	0	0,003783
Zn	ZnO	0,003734	0,003734	0,003734	0,003734	0,003734	0,003734
Zr	ZrO ₂	0,047278	0,048629	0,047278	0,048629	0,05133	0,04998

CONVERSÃO DOS ELEMENTOS PARA ÓXIDOS (%)							
ELEMENTO	ÓXIDO	ML _{k(1)}			ML _{k(2)}		
Ag	Ag ₂ O	0	0	0	0	0	0
As	As ₂ O ₃	0,010562	0,009242	0,010562	0,010562	0,009242	0,010562
	As ₂ O ₅	0,012271	0,010737	0,012271	0,012271	0,010737	0,012271
Ba	BaO	0	0,013398	0,014515	0	0	0
Ca	CaO	11,24957	11,80085	11,83024	11,52101	11,27475	11,46085
Cr	Cr ₂ O ₃	0,007308	0,007308	0,010231	0,007308	0,007308	0
Cs	Cs ₂ O	0	0	0	0	0	0
Cu	CuO	0,006259	0,006259	0,006259	0,006259	0,005007	0,005007
Fe	FeO	2,13559	2,099568	2,102141	2,117579	2,201202	2,19091
	Fe ₂ O ₃	2,373302	2,33327	2,33613	2,353286	2,446217	2,434779
K	K ₂ O	2,07673	2,159848	2,177917	2,150211	2,112868	2,158643
Mn	MnO	0,04261	0,040027	0,041318	0,038736	0,040027	0,037445
Ni	NiO	0,007635	0,007635	0,008908	0,006363	0,00509	0,006363
Pb	PbO	0,005772	0,005772	0,005772	0,005772	0,005772	0,005772
Pd	PdO	0,005752	0,005752	0,005752	0,005752	0,005752	0,005752
Rb	Rb ₂ O	0,021872	0,021872	0,021872	0,021872	0,021872	0,021872
S	SO ₃	0,099888	0,147335	0,097391	0,099888	0,157324	0,137346
Sb	Sb ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0
	Sb ₂ O ₅	0	0	0	0	0	0
Sc	Sc ₂ O ₃	0,035277	0,030676	0,03221	0,033744	0,019939	0,026075
Sn	SnO ₂	0,010157	0,021583	0,022853	0,012696	0,008887	0,010157
	SnO	0,009078	0,019292	0,020426	0,011348	0,007944	0,009078
Sr	SrO	0,008278	0,008278	0,008278	0,008278	0,008278	0,008278
Te	TeO ₃	0	0	0	0	0	0
Th	ThO ₂	0,003207	0,003207	0,003207	0,003207	0,003207	0,003207
	ThO	0,003414	0,003414	0,003414	0,003414	0,003414	0,003414
Ti	TiO ₂	0,513775	0,555477	0,557145	0,543801	0,543801	0,557145
U	UO ₂	0,003403	0,004538	0,003403	0,004538	0,004538	0,004538
	UO ₃	0,003605	0,004807	0,003605	0,004807	0,004807	0,004807
	U ₃ O ₈	0,003538	0,004717	0,003538	0,004717	0,004717	0,004717
V	V ₂ O ₅	0,019637	0,021422	0,019637	0,019637	0,014282	0,017852
W	WO ₃	0,005044	0,005044	0,003783	0,003783	0,005044	0,003783
Zn	ZnO	0,034854	0,03361	0,032365	0,034854	0,034854	0,034854
Zr	ZrO ₂	0,041875	0,052681	0,052681	0,058084	0,055383	0,055383

ÓXIDO	CONCENTRAÇÃO MÉDIA (%)				
	PT _x	PT _G	IN ₁	IN ₂	ML _k
Ag ₂ O	0,002685	0	0,001074	0,003938	0
As ₂ O ₃	0,005061	0,00132	0,002641	0,00132	0,010122
As ₂ O ₅	0,00588	0,001534	0,003068	0,001534	0,01176
BaO	0,024005	0	0,039078	0,046521	0,004652
CaO	0,731082	0,256054	2,69416	1,756229	11,52288
Cr ₂ O ₃	0,017538	0	0	0,000974	0,006577
Cs ₂ O	0,00053	0	0,00106	0,002474	0
CuO	0,003547	0,001043	0,001669	0,002086	0,005842
FeO	6,942168	1,061577	2,698219	2,42248	2,141165
Fe ₂ O ₃	7,714899	1,179741	2,998557	2,692125	2,379497
K ₂ O	2,560578	2,923765	3,242984	2,479067	2,13937
MnO	0,08027	0,016786	0,062408	0,04885	0,040027
NiO	0,011665	0	0,006575	0,006999	0,006999
Rb ₂ O	0	0,004618	0	0	0,005772
PdO	0	0,004602	0	0	0,005752
Rb ₂ O	0,009842	0,018773	0,012576	0,009842	0,021872
SO ₃	0	0	0	0	0,123195
Sc ₂ O	0,007158	0,001023	0,006135	0,00588	0,029653
SnO ₂	0,000423	0	0,00127	0,001693	0,014389
SnO	0,000378	0	0,001135	0,001513	0,012861
SrO	0,007096	0,007096	0,012614	0,014191	0,008278
TeO ₃	0,000688	0	0,000688	0,002752	0
ThO ₂	0	0,001069	0,001782	0,001604	0,003207
ThO	0	0,001138	0,001897	0,001707	0,003414
TiO ₂	1,29806	0,201562	0,624425	0,63082	0,545191
UO ₂	0,000189	0,002647	0,001134	0,001134	0,004159
UO ₃	0,0002	0,002804	0,001202	0,001202	0,004406
U ₃ O ₈	0,000197	0,002751	0,001179	0,001179	0,004324
V ₂ O ₅	0,041357	0,000893	0,017554	0,016959	0,018745
WO ₃	0,00042	0	0,000841	0,001261	0,004414
ZnO	0,001245	0,010996	0,004772	0,003734	0,034232
ZrO ₂	0,05088	0,01711	0,052006	0,048854	0,052681