Instituto Superior de Engenharia do Porto
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Determinação dos tempos de secagem de solos em função da sua identificação: avaliação exploratória

Ana Filipa Reis Oliveira

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Determinação dos tempos de secagem de solos em função da sua identificação: avaliação exploratória

Determination of drying times of soils as a function of their identification: exploratory evaluation

Ana Filipa Reis Oliveira

1191736

Estágio apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de ***Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente****, realizado sob a orientação do Doutor João Paulo Meixedo, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

Júri

Presidente

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

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva
Professor Coordenador, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutora Lídia Maria Gil Catarino
Professora Auxiliar, Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

*A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente** (MEGG) foi apresentada e defendida em prova pública, por **Ana Filipa Reis Oliveira**, em 9 de Novembro de 2022 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **18 (dezoito) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

Agradecimentos

São devidos agradecimentos a todas as pessoas e entidades que, de alguma forma, tornaram possível a realização desta dissertação, em formato estágio profissional no Laboratório Central da Mota-Engil – Engenharia & Construção SA, em especial:

Ao meu orientador, Professor João Paulo Meixedo (DEG|ISEP), por me permitir elaborar o presente estudo segundo a sua orientação, pelo desafio proposto e pelo apoio e disponibilidade demonstrada ao longo do meu percurso académico e leitura cuidada do manuscrito final da dissertação.

À Mota-Engil – Engenharia & Construção SA, e em especial à Engenheira Carla Ferreira Sousa, pela oportunidade dada para a execução desta dissertação, bem como por todo o tempo, entrega, partilha de conhecimentos e apoio na escrita e desenvolvimento do presente documento. Devo ainda um especial agradecimento a todos os colaboradores do Laboratório Central, que direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração deste trabalho, por todo o apoio, dedicação e partilha de experiências que se revelaram fundamentais para a aprendizagem de novos conhecimentos e correta execução do estudo aqui apresentado.

A todos os docentes do Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente que partilharam o seu conhecimento e contribuíram para a minha formação avançada em geoengenharia no Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Aos meus amigos e colegas, não só pela amizade, como também por todo o interesse, apoio e motivação dada ao longo de todo este percurso.

Por fim, e com especial carinho, à minha família por toda a força, incentivo, amor e dedicação à realização e conclusão desta etapa da minha vida.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para o meu sucesso, o meu:

Profundo agradecimento!

Palavras-chave

Identificação; Solos; Teor em água; Métodos de obtenção; Tempos de secagem

Resumo

O presente estudo pretende abordar a importância do teor em água e da sua determinação em solo com finalidades em engenharia e construção. Com o intuito de definir um tempo de secagem mais curto e adequado conforme a identificação do solo, foi determinado o teor em água natural de 45 solos distintos. Tendo em conta os diversos fatores que influenciam o tempo de secagem, averiguou-se se amostras com maiores quantidades de material efetivamente recorrem a mais tempo em estufa, assim como se o aumento da quantidade de água presente tem o mesmo efeito, quer em areias, quer em argilas. Devido à grande diversidade de método disponíveis para a obtenção do teor em água, e levando em consideração o tempo e instrumentos aos quais o método padrão da secagem em estufa recorrem, avaliou-se o desempenho do método de aquecimento direto, da combustão de álcool e do *speedy*, com o objetivo de analisar a possibilidade de algum destes poder representar uma substituição à secagem em estufa. A investigação permitiu concluir que o teor em água apresenta maior relevância em solos argilosos e que o mesmo é influenciado por diversos fatores, nomeadamente: índice de plasticidade, massa ensaiada e quantidade de água. Apesar da correlação positiva entre os métodos expeditos e o padrão, na eventualidade de ser necessário recorrer a uma técnica não padronizada, recomenda-se, de entre os estudados, o método do aquecimento direto.

Keywords

Identification; Soils; Water content; Methods; Drying times

Abstract

The present study addresses the importance of water content and its determination in soil for engineering and construction purposes. According to the soil identification, the natural water content of 45 different soils was determined to define a shorter and more adequate drying time. Considering the various factors that influence the drying time, it was verified if samples with larger amounts of material use more time in the oven, as well as if the increase in the amount of water present has the same effect, whether in sands or clays. Due to the diversity of methods available to obtain the water content, the performance of the direct heating method, the combustion of alcohol, and speedy was evaluated to analyse the possibility of a substitute for the oven drying technique. The investigation allowed us to conclude that the water content is more relevant in clayey soils and can be influenced by several factors, for instance: plasticity index, tested mass, and amount of water in the sample. Despite the positive correlation between the expedited and the standard methods, if it was necessary to resort to a technique that was not standardized, the direct heating method is recommended among those studied.

Índice

Índice xiii
Índice de figuras xv
Índice de quadros xvii
Índice de fórmulas xix
Abreviaturas xxi
Simbologia xxiii
1. Introdução 3
1.1. Âmbito 3
1.2. Enquadramento 3
1.3. Objetivos 4
1.4. Estrutura da dissertação 5
2. Revisão bibliográfica 9
2.1. Solos e influência do teor em água 9
2.2. Amostragem 11
2.3. Métodos de obtenção do teor em água 16
2.3.1. Método gravimétrico ou secagem em estufa 17
2.3.2. Aquecimento direto 19
2.3.3. Método da combustão do álcool 25
2.3.4. Método do speedy ou método do carbureto de cálcio 29
2.3.5. Método do micro-ondas 37
2.3.6. Método do banho de areia 44
2.3.7. Método da balança de torção por infravermelhos 45
2.3.8. Método radioativo ou nuclear 46
2.3.9. Método do picnómetro 47
2.3.10. Método com recurso a sensores 48
3. Trabalho experimental 53
3.1. Objetivos do trabalho experimental 53
3.2. Planeamento do trabalho experimental 53
3.2.1. Ensaios de identificação 54
3.2.2. Teor em água natural 57
3.2.3. Estudo da influência da massa no tempo de secagem 58
3.2.4. Estudo da influência da percentagem de teor em água no tempo de secagem 60
3.2.5. Seleção das amostras para obtenção do teor em água por métodos expeditos 61
3.2.6. Método do aquecimento direto 64
3.2.7. Método da combustão do álcool 65
3.2.8. Método do speedy 67
4. Análise crítica dos resultados 71
4.1. Influência da massa no tempo de secagem 71
4.2. Influência do teor em água no tempo de secagem 72
4.3. Tempos de secagem do teor em água natural 74
4.4. Proposta de tempos de secagem a aplicar consoante identificação do solo 79
4.5. Teor em água obtido pelos métodos expeditos 80
4.6. Análise crítica do teor em água obtido pelos métodos expeditos 87
5. Considerações finais 94
5.1. Conclusões 94
5.2. Limitações e Perspetivas futuras 95
6. Referências Bibliográficas 100

Índice de figuras

Figura 1: Fases constituintes de um solo (Adaptado de Fernandes, 1994). 9
Figura 2: Resumo esquemático da influência da presenta de água em minerais de argila. 11
Figura 3: Amostradores de solos argilosos: a) Amostrador *Sherbrooke*, b) Amostrador *Shelby* e c) Amostrador *Osterberg*. (FEUP, 2008)..... 13
Figura 4: Sequência de amostragem com recurso ao amostrador Laval (Fonte: Norberto, 2017). 14
Figura 5: Amostradores para solos arenosos: a) Amostrador *Mazier* (Cordeiro, 2018) e b) Amostrador *Bishop* (Nogueira, 1977)..... 15
Figura 6: Amostradores de solos: a) Amostrador *Pitcher* (FEUP, 2008) e b) Amostrador *Denison* (Viana, 2016). 16
Figura 7: Método do speedy: a) garrafa speedy; b) balança (adaptado de (Haque, 2001)). 30
Figura 8: Curva de calibração típica do equipamento *speedy* (ASTM D4944-04, 2004). 35
Figura 9: Conjunto de instrumentos utilizados para a realização dos ensaios para obtenção do teor em água. 54
Figura 10: Sequência de operações realizadas para obtenção do teor em água em estufa. 58
Figura 11: Sequência de operações para verificar influência da massa no tempo de secagem de amostras de solos..... 59
Figura 12: Estudo da influência do w no tempo de secagem de uma areia (A1198/17). 60
Figura 13: Estudo da influência do w no tempo de secagem de uma argila (A0791/22). 61
Figura 14: Sequência de operações realizadas para obtenção do w pelo método do aquecimento direto. 65
Figura 15: Sequência de operações para obtenção do w pelo método de combustão do álcool. .. 66
Figura 16: Sequência de operações para obtenção do w pelo método do speedy. 68
Figura 17: Gráfico representativo do *w* obtido pelos métodos expeditos em A0541/22 (areia NP) 82
Figura 18: Gráfico representativo do w obtido pelos métodos expeditos em A0860/22 (areia NP)……80
Figura 19: Gráfico representativo do w obtido pelos métodos expeditos em A0603/22 (areia NP)……81
Figura 20: Gráfico representativo do coeficiente de correlação dos métodos expeditos realizados em areias NP. 82
Figura 21: Gráfico representativo do w obtido pelos métodos expeditos em A0543/22 (areia LL).822
Figura 22: Gráfico representativo do *w* obtido pelos métodos expeditos em A0771/22 (areia LL).83
Figura 23: Gráfico representativo do w obtido pelos métodos expeditos em A0798/22 (areia LL).82
Figura 24: Gráfico representativo do coeficiente de correlação dos métodos expeditos realizados em areias LL……82
Figura 25: Gráfico representativo do w obtido pelos métodos expeditos em A0795/22 (silte)…….83
Figura 26: Gráfico representativo do *w* obtido pelos métodos expeditos em A0597/22 (silte)…….84
Figura 27: Gráfico representativo do w obtido pelos métodos expeditos em A0544/22 (argila)….84
Figura 28: Gráfico representativo do w obtido pelos métodos expeditos em A0791/22 (argila)….84
Figura 29: Gráfico representativo do *w* obtido pelos métodos expeditos em A0792/22 (argila). .. 86
Figura 30: Gráfico representativo do coeficiente de correlativo dos métodos expeditos realizados em argilas……84

Índice de quadros

Quadro 1: Massas mínimas para realizar ensaio de teor em água em estufa (NP-84, 1965)..... 18
Quadro 2: Massas recomendadas de amostras a usar no método do aquecimento direto (ASTM D4959-00, 2000)..... 21
Quadro 3: Massas recomendadas de amostras a usar no método do micro-ondas (ASTM D4643-00, 2000). 40
Quadro 4: Massas mínimas a obter na fração retida no peneiro nº 10, no ensaio da análise granulométrica (LNEC E195, 1966). 55
Quadro 5: Grupos de amostras estudadas, de acordo com classificação..... 61
Quadro 6: Listagem de amostras utilizadas para realizados dos métodos expeditos para obtenção do *w*..... 63
Quadro 7: Determinação da massa das amostras a ensaiar no método de aquecimento direto. .. 64
Quadro 8: Tempos de secagem de amostras de areia (A1198/17) com diferentes massas e *w* semelhante..... 71
Quadro 9: Tempos de secagem de amostras de argila (A0797/22) com diferentes massas e *w* semelhante..... 71
Quadro 10: Tempos de secagem de amostras de areia (A1198/17) com diferente *w* e massa semelhante (método gravimétrico). 74
Quadro 11: Tempos de secagem de amostras de argila (A0797/22) com diferente *w* e massa semelhante (método gravimétrico). 74
Quadro 12: Tempos de secagem de amostras de areia NP (método gravimétrico)..... 75
Quadro 13: Tempos de secagem de amostras de areia LL (método gravimétrico)..... 76
Quadro 14: Tempo de secagem da amostra de cascalho (método gravimétrico)..... 77
Quadro 15: Tempos de secagem de amostras de silte (método gravimétrico)..... 77
Quadro 16: Tempos de secagem de amostras de argila (método gravimétrico). 78
Quadro 17: Proposta de tempos de secagem a aplicar consoante identificação do solo. 80
Quadro 18: Teor em água obtidos em areias NP por aplicação de métodos expedidos..... 81
Quadro 19: Teor em água obtidos em areias LL por aplicação de métodos expedidos. 83
Quadro 20: Teor em água obtidos em siltes por aplicação de métodos expedidos..... 84
Quadro 21: Teor em água obtidos em argilas por aplicação de métodos expedidos..... 85
Quadro 22: Teor em água obtidos em 9 amostras de areia LL por aplicação de métodos expedidos. 87
Quadro 23: Resumo de todos os resultados de w obtidos pelos métodos expeditos..... 89
Quadro 24: Vantagens e inconvenientes associados aos métodos de obtenção do teor em água aplicados nesta investigação..... 90

Índice de fórmulas

Equação 1 19
Equação 2 33
Equação 3 47
Equação 4 80
Equação 5 80

Abreviaturas

ASTM - American Society for Testing and Materials

DEG - Departamento de Engenharia Geotécnica

FDR - Domínio de frequência

DNHP - Dual Needle Heat Pulse ("Pulso térmico de agulha dupla")

g - grama

° - grau

°C - grau Celsius

h – horas

LABC - Laboratório Central

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

m - metro

mm - milímetro

MEEC - Mota-Engil – Engenharia & Construção SA

nº - número

% - percentagem

in. - polegada

TDR - Reflectometria de domínio temporal

Simbologia

G – Densidade relativa

m_1 – Massa do recipiente

m_2 – Massa do recipiente com solo húmido

m_3 - Massa do recipiente com solo seco

V – Volume total da amostra

Vv – Volume de vazios

Va – Volume de ar

Vw– Volume de água

Vs – Volume de partículas sólidas

w1 – Peso do picnómetro com tampa

w2 - Peso do picnómetro com tampa e solo húmido

w3 - Peso do picnómetro com tampa, solo húmido e água

w4 - Peso do picnómetro com tampa e água

W_T – Peso total da amostra

Wa– Peso do ar

$\boldsymbol{w}$ - Teor em água

w_{dry} – Teor em água da massa seca

w_{wet} – Teor em água da massa húmida

Ww– Peso da água

Ws– Peso das partículas sólidas

Capítulo I

Introdução

1. Introdução

1.1. Âmbito

O presente documento enquadra-se no âmbito da unidade curricular "Dissertação/Projeto/Estágio", 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), Politécnico do Porto (P.Porto). A dissertação foi acompanhada por um estágio curricular realizado em conjunto com a Mota-Engil – Engenharia & Construção SA (MEEC), mais propriamente no Laboratório Central (LABC), com duração de 6 meses. Este encontra-se sob a responsabilidade da engenheira Carla Ferreira Sousa, também supervisora da presente dissertação. Todo o trabalho desenvolvido, quer para a escrita deste documento como para sua futura discussão pública foram fundamentais para concluir o 2º ciclo de estudo que proporcionam a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente.

1.2. Enquadramento

A presente dissertação debruça-se sobre o teor em água de solos que, de um modo simplificado, traduz a quantidade de água presente no material. Este pode ser indicado através do volume de água por unidade de volume total, ou em massa de água por unidade de massa de solo seco, tratando-se assim de teor em água volumétrico e teor em água gravimétrico, respetivamente.

A quantidade de água presente em determinado material é uma propriedade de extrema importância em diversas áreas, como por exemplo, na agricultura, dado que influencia diversos processos no solo e plantas como movimento da água compactação, aeração do solo e desenvolvimento radicular, entre outros (Oliveira Lucas, 2019). E como seria de esperar, na engenharia a relevância é tanto, ou maior, na medida em que é crucial determinar a viabilidade do terreno no apoio à construção de qualquer obra de engenharia para prevenir futuras adversidades. O comportamento do solo apresenta relação direta com o teor em água (w) em diversas questões, nomeadamente: na compactação, resistência ou capacidade de suporte de carga, estabilidade de obras de terra e fundações e assentamentos. A acrescentar, o teor em água natural também caracteriza o desempenho do solo superficial sob a ação de carga (Bhatt & Jain, 2014). A capacidade que determinado terreno apresente para sustentar qualquer obra de engenharia, isto é a sua resistência, depende essencialmente da densidade e da humidade das particulas. Quando um solo apresenta uma quantidade substancial de humidade, as moléculas de água proporcionam um apoio

e uma aderência acrescida (G3SoilWorks, 2021). A compactação de um solo consiste na aplicação de energia neste com o intuito de reduzir o índice de vazios, de o tornar mais denso e melhorar características como permeabilidade, absorção de água, compressibilidade e resistência. Para que tal ação seja executada devidamente, e possa evitar problemas futuros, é necessário ter especial atenção, não só à energia aplicada, como também à quantidade de água presente no solo, que deve estar num ponto ideal, denominado de teor em água ótimo (Schreiner & Rodrigues, 2018).

Todos os fatores mencionados demonstram a importância inerente à determinação do teor em água, suportando a escolha do tema de estudo.

1.3. Objetivos

Como mencionado, o teor em água é uma propriedade dos solos de enorme relevância no que diz respeito a obras de engenharia, no entanto, e como será abordado adiante nesta dissertação, existe um grupo vasto de métodos que permitem obter um valor para esta propriedade. De entre estes, o método gravimétrico de secagem em estufa corresponde ao método padrão e serve como técnica de calibração para todas as restantes. Apesar de ser um método de simples execução, consiste num ensaio com duração de 24 h, o que nem sempre é conveniente em ambiente de obra devido a prazos e metas de eficiência a cumprir. Esta questão levou ao principal objetivo deste trabalho que corresponde a definir um tempo de secagem aproximado para diferentes classificações de solo, de modo que este ensaio possa ser realizado com o mesmo sucesso e precisão, mas em menos tempo. A literatura sugere que não só o tipo de solo que interfere no tempo de secagem, mas também a quantidade de água presente nele, assim como a quantidade de amostra que será submetida a secagem e, portanto, tomou-se como outro objetivo averiguar tais hipóteses.

De modo a complementar este estudo, e por, devido a questões práticas, nem sempre ser possível recorrer a uma estufa, o presente documento procura perceber se alguns dos inúmeros métodos disponíveis consegue substituir o método padrão com a mesma satisfação de resultados. Para esta investigação selecionaram-se os métodos do aquecimento direto (com recurso a uma placa de aquecimento), da combustão do álcool e do *speedy*. A seleção destes métodos deve-se ao facto de serem técnicas muito documentadas na literatura e por estarem disponíveis os meios necessários à sua execução no Laboratório Central.

1.4. Estrutura da dissertação

Neste ponto, encontra-se definida a organização estrutural do presente documento. Pelo que serão referidos, sucintamente, os aspetos mais relevantes presentes em cada capítulo.

- Capítulo I – Introdução

No presente capítulo, é feita uma contextualização, sendo exposto o tema sobre o qual a dissertação se debruça, assim como a sua importância. Ainda neste capítulo são apresentados os objetivos a atingir e a descrição aqui feita da estrutura do documento.

- Capítulo II – Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentadas algumas noções teóricas relativas aos solos, bem como uma breve referência a amostragem. Grande parte do conteúdo especificado neste capítulo, é referente às diferentes técnicas de ensaio disponíveis para a obtenção do teor em água.

- Capítulo III – Trabalho experimental

O terceiro capítulo reforça os objetivos da dissertação mais focados na parte experimental, sendo neste também descrito todo o planeamento prévio à execução dos ensaios a serem realizados para concretizar esses mesmo objetivos.

- Capítulo IV – Análise de resultados

No capítulo número quatro são apresentados os resultados obtidos dos diversos ensaios realizados, bem como a sua respetiva análise. Nesta análise consta uma comparação entre os tempos de secagem para amostras com classificações distintas, assim como as diferenças verificadas para amostras com a mesma, mas com algumas variantes, nomeadamente massa e teor em água.

Ainda neste capítulo, foi estudada a correlação entre as técnicas expeditas (isto é, o método do aquecimento direto, da combustão do álcool e do *speedy*) e o método padrão, e a determinação de um fator de correção.

- Capítulo V – Considerações finais

O último capítulo resume os pontos chave e conclusivos do presente estudo, salvaguardando algumas das suas limitações, e deixam-se algumas perspetivas futuras no âmbito do tema.

Finalmente, é apresentada uma listagem onde consta a literatura consultada e que serve de base e auxílio no desenvolvimento desta dissertação, denominada de “Referências Bibliográficas”.

Capítulo II

Revisão Bibliográfica

2. Revisão bibliográfica

2.1. Solos e influência do teor em água

Solo pode ser definido de diversas formas consoante o seu ramo de aplicação, mas para a geotecnia, e de acordo com Fernandes (1994), Mineiro (1978) define solo como sendo, e passando a citar "toda a ocorrência natural de depósitos brandos ou moles, cobrindo um substrato rochoso e que é produzida por desintegração e decomposição física e química das rochas, podendo ou não conter matéria orgânica". Pelo mesmo autor é também apresentada a definição fornecida pelo LNEC que caracteriza o solo como sendo o "conjunto natural de partículas minerais que podem ser separadas por agitação na água; os vazios entre as partículas contêm água e ar, separada ou conjuntamente". Tal sugere que os solos são materiais polifásicos constituídos por três frases: as partículas sólidas, a água e o ar, sendo que estas duas últimas preenchem os vazios ou poros do solo (Figura 1). Quando estes vazios se encontram totalmente preenchidos com água, o solo diz-se saturado.

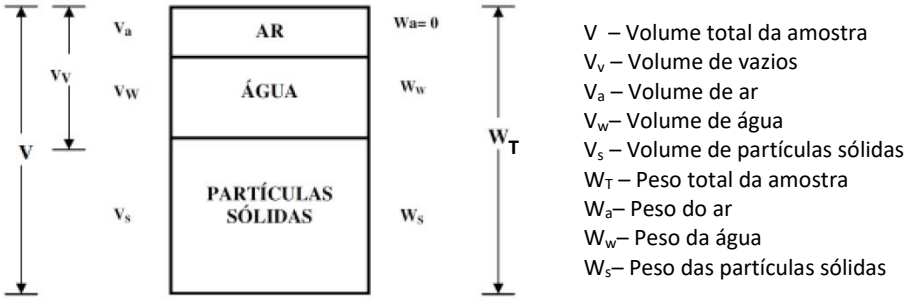


Figura 1: Fases constituintes de um solo (Adaptado de Matos Fernandes, 1994).

São diversas as grandezas que descrevem o estado físico do solo, particularmente: índice de vazio, porosidade, grau de saturação, teor em água, peso volúmico do solo, peso volúmico seco, peso volúmico das partículas, peso volúmico submerso e densidade das partículas, sendo que os principais ensaios de identificação são os limites de consistência e a análise granulométrica. Este último corresponde à distribuição ponderal das partículas do solo de acordo com as suas dimensões e permite classificá-lo, por ordem crescente de dimensões, em: argilas, siltes, areias e cascalhos ou (seixos). O ensaio realizado na fração mais fina pode apresentar erros relativamente apreciáveis, todavia, de tal facto não surgem grandes repercussões visto que é nos solos granulares (constituídos sobretudo por areias e cascalhos) que o ensaio demonstra ser mais útil dado que o comportamento deste tipo de solos depende essencialmente da forma e dimensão das partículas que o constituem. Tal facto pode ser ilustrado com a influência do tamanho das partículas, que terá consequências na forma como estas se organizam, no estado de compactação de um solo. Em outras palavras, um solo que seja identificado como bem graduado por ser constituído por partículas com várias dimensões, é um solo que apresenta um índice de vazios mínimo bastante

baixo, o que resulta numa organização mais compacta das partículas. Enquanto em solos de granulometria mal graduada, em que os tamanhos das partículas são muito semelhantes entre si, havendo assim vazios relativamente grandes entre si, tornando quase impossível a arrumação do solo de forma compacta. A acrescentar, para além de este tipo de partículas serem, muitas vezes, constituídas por quartzo que é um material quimicamente estável, em consequência das dimensões dos grãos, a sua superfície especifica é muito baixa uma vez que esta propriedade é inversamente proporcional ao tamanho. Assim sendo, as forças de superfície, que se manifestam entre as moléculas dispostas na superfície das partículas e a água nos poros do solo, são desprezáveis, sendo claramente ultrapassadas pelas forças gravíticas.

Acontece o oposto nos solos de granulometria mais fina, mais propriamente nas argilas. Este tipo de materiais é caracterizado por importantes forças de superfície e essas sim comandam o comportamento do conjunto de partículas. Tal situação deve-se essencialmente a três fatores: o facto de as partículas serem de dimensões reduzidas e de forma essencialmente laminar, que tem como consequência a criação de enormes superfícies especificas, o que significa que grande parte das moléculas se encontram à respetiva superfície; e ainda a composição mineralógica, onde se incluem os silicatos hidratados de alumina, que favorecem o desenvolvimento de reações químicas com a água presente o solo e com os sais que estão dissolvidos nela.

A própria estrutura molecular, onde cargas elétricas negativas se dispõem nas faces e algumas cargas elétricas positivas nos bordos das partículas, é propícia à criação de forças atrativas a repulsivas. Sendo as primeiras, resultado da atração de catiões de sais dissolvidos e de moléculas de água até que esta seja eletricamente neutra, passando a água a designar-se por água dissolvida; e as segundas, consequência das cargas elétricas do mesmo sinal na periferia das partículas. Assim, as partículas adaptam-se de modo a haver equilíbrio entre as duas forças. Como as moléculas de água são parte responsável deste processo e do equilíbrio da partícula, o teor em água irá influenciar de maneira direta o comportamento deste tipo de materiais. Mais especificamente a presença de quantidades significativas de água, que se traduzirá num teor em água elevado, o equilíbrio descrito irá estabelecer-se com distâncias consideráveis entre as partículas, sendo que cada uma estará rodeada por uma “nuvem” de moléculas de água e catiões de sais que se refletirá num solo com elevado índice de vazios e porosidade e com baixa consistência. Se, pelo contrário, a água estiver presente em quantidades reduzidas, sendo o teor em água menor, também a nuvem descrita anteriormente será menor visto que o equilíbrio será atingido em menores distâncias. Esta situação terá como resultado um solo com grande força entre partículas, um menor índice de vazios e porosidade, e o material apresentará maior compacidade e elevada consistência. O resumo esquemático ilustrado na Figura 2, permite concluir que o teor em água é a propriedade que

determina a disposição das partículas, o índice de vazios e a consistência deste tipo de materiais (Matos Fernandes, 1994).

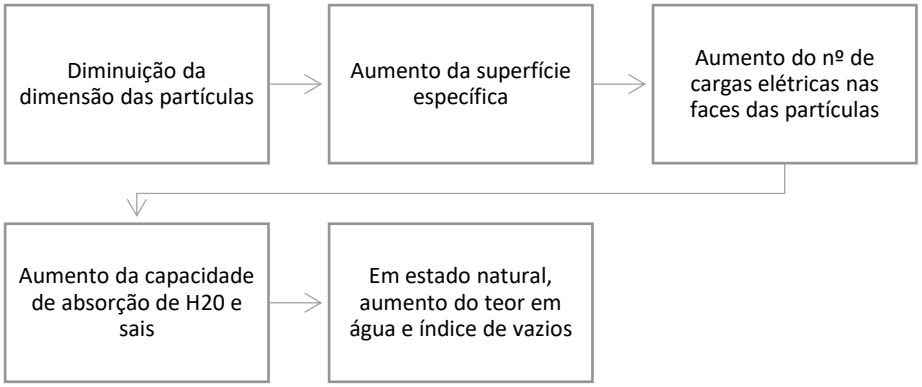


Figura 2: Resumo esquemático da influência da presenta de água em minerais de argila.

2.2. Amostragem

A recolha de amostras é de extrema importância na engenharia e só não ocorre salvo raras exceções. Esta apresenta aspetos bastante vantajosos dado que permite observar e identificar o material presente em determinado local e torna possível a realização de ensaios físicos laboratoriais que fornecem informações cruciais sobre inúmeros parâmetros e propriedades que farão parte dos alicerces de qualquer projeto. A frequência com que é executada e a escolha do tipo de amostragem são decisões tomadas consoante as características e limitações do local, das necessidades do estudo e, no caso de sondagens de furação, dependente do tipo de furação. Quando se recorre a mecanismos de percussão, é feita pelo menos uma colheita sempre que haja mudança no terreno, devendo-se, nestes casos, limitar a um espaçamento de cerca de 2 m (Lima & Menezes, 2008).

As amostras colhidas podem ser:

- Indeformadas, ou intactas, quando apenas sofreram alteração pelo alívio do estado de tensão in situ, tendo sido conservada a textura, estrutura e humidade;
- Deformadas, se não for preservada a estrutura da(s) camada(s) amostrada(s), mas for possível a identificação dos estratos; e
- Remexidas, quando a macroestrutura foi destruída, mas não ocorreu alteração da sua composição mineralógica. Por consistirem numa amostra de fraca qualidade tendo têm uso limitado em laboratório sendo utilizadas quase exclusivamente para a identificação do material (Viana, 2016).

A extração de amostras intactas acarreta cuidados especiais e acrescidos, quer durante a recolha, quer durante o transporte, mas pode ser efetuada com recurso a amostradores relativamente simples.

Para a recolha de solos coerentes, como é o caso das argilas, os amostradores mais simples consistem, muito sucintamente, num tubo aberto numa das extremidades e fechado na outra, onde existe uma válvula que permite a saída do ar quando a amostra entra no tubo. São exemplos: os amostradores *Sherbrooke* e *Shelby* (Figura 3a) e b)), para solos argilosos duros (com baixa plasticidade) e argilosos moles (sem elementos grosseiros), respetivamente (Lima & Menezes, 2008). O amostrador *Sherbrooke* corresponde a um amostrador de parede espessa que permite retirar blocos cilíndricos com 250 mm de diâmetro e 350 mm de altura em profundidade a partir da superfície. O tubo do amostrador *Shelby* pode apresentar dimensões variadas, mas as principais características que o definem são a parede delgada, com cerca de 3 mm, e o ângulo de bisel de 30°. Este é introduzido com auxílio de um sistema hidráulico e deve ser feita de forma contínua. Quando a amostra é extraída deste modo, deve ser selada com uma camada de resina microcristalina em ambas as extremidades, onde também é colocado um disco entre a resina e solo de modo a preservar a qualidade da amostra (Ramos et al., 2021).

Quando há acesso direto à amostra (através de poços, galerias ou valas), os amostradores são ainda mais simplificados, consistindo num cilindro de paredes fina que se cravam no terreno por processo dinâmico. Contudo, esse processo torna difícil a obtenção de amostras com qualidade devido à perturbação que resulta da cravação. Por este motivo, tem se optado por amostradores que recorrem à penetração no terreno através de pressão, como é o caso do amostrador de *Osterberg* (Figura 3c)). A cravação deste é feita com recurso a ar comprido introduzido no interior das varas e é suspensa automaticamente quando o invólucro está totalmente preenchido. Assim, além de consistir numa cravação muito mais suave, evita a "sobrecravação" o que possibilita a extração de amostras menos deformadas (Ramos et al., 2021). Amostras de solos argilosos moles podem ser extraídas por recursos a este amostrador.

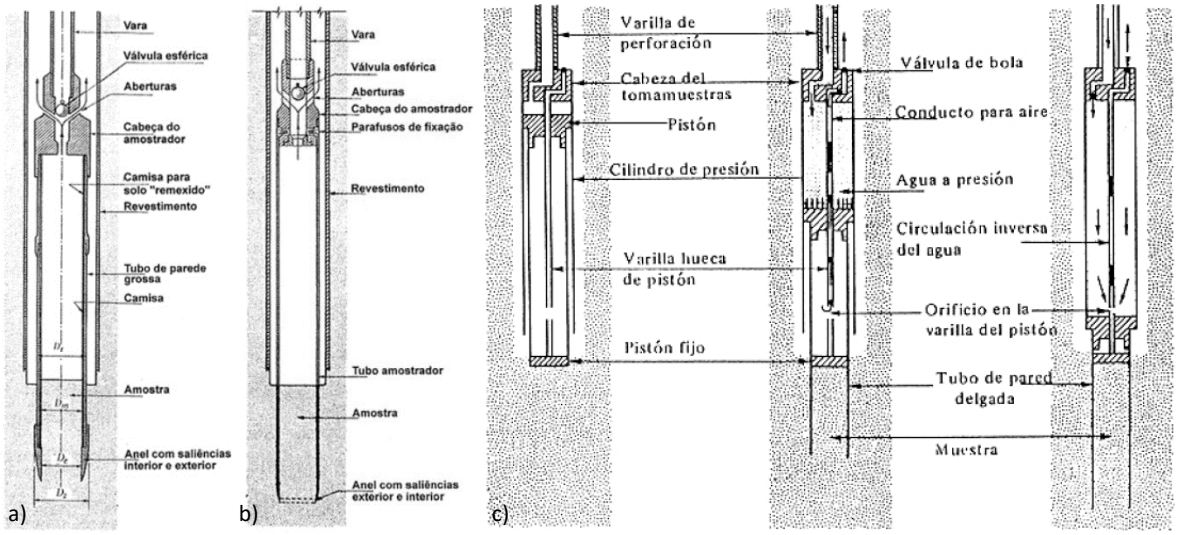


Figura 3: Amostradores de solos argilosos: a) Amostrador *Sherbrooke*, b) Amostrador *Shelby* e c) Amostrador *Osterberg* (Lima & Menezes, 2008).

A colheita de amostras em acesso direto, pode ainda ser realizada por aplicação do método da amostragem em blocos. De um modo simplificado, este método, que recorre inúmeras vezes ao amostrador *Sherbrooke*, resume-se ao conjunto de quatro operações: corte grosseiro da amostra, talhamento do bloco, selagem da amostra e separação do maciço. Esta técnica é algo limitada quando é pretendida a sua realização abaixo do nível freático, sendo um método bastante condicionado em profundidades médias a grandes. Todavia, apresenta uma enorme vantagem comparativamente aos restantes métodos que serão apresentados por ser aquele que causa menor perturbação das características *in situ* do material dado que não há intrusão de elementos estranhos, o que traduz numa qualidade de amostra superior.

Um método que pode permitir obter resultados comparáveis a esta técnica corresponde ao sistema de amostragem *Laval* (Figura 4). Este permite uma amostragem contínua através de um amostrador com 660 mm de comprimento e 200 mm de diâmetro de tubo sem pistão e sem folga interior, e que apresenta um ângulo de corte de 5° e 4 mm de espessura de parede. Amostras de solos finos são extraídas pela cravação de um tubo de amostragem e fixação de um tubo externo que depois desce e faz a limpeza externa do furo por rotação (Norberto, 2017).

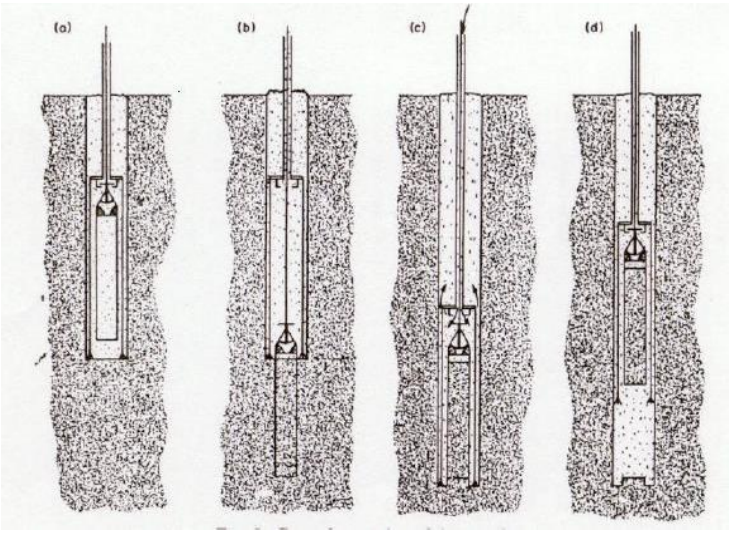


Figura 4: Sequência de amostragem com recurso ao amostrador Laval (Fonte: Norberto, 2017).

A partir do conceito de preservação estrutural deste último amostrador, foi idealizado o amostrador *Mazier* (Figura 5 a)), mas com maior flexibilidade de potência. Este é constituído por um tubo interior (*liner*, feito em polietileno) com comprimento de 1000 mm e um diâmetro compreendido entre 61 e 108,5 mm. Para além de a sua geometria permitir um coeficiente de parede (ou coeficiente da razão) de 3,5 %, apresenta particularidades como: possuir um tubo cortante (solidário com o tubo *liner*) que segue em avanço no processo de cravação de um intervalo inversamente proporcional à rigidez ou resistência do solo; e um diâmetro interno no tubo cortante com valor ligeiramente inferior ao do *liner* (folga interior), que não é aconselhável para todos os solos; e ainda uma "cesta" de retenção de dentes abertos que o torna adequado para solos arenosos compactados (Ramos et al., 2021) .

Um outro amostrador disponível para recolha de areias é o *Bishop* (Figura 5 b)). Em relação a outros amostradores, este apresenta uma mais-valia uma vez que possibilita a extração de amostras abaixo do nível freático devido à presença de uma válvula estanque na cabeça do amostrador. Permite ainda aplicação em solos coerentes, todavia não pode ser utilizado para recolher amostras inalteradas de solo com seixos devido ao atrito sobre as paredes do tubo criado por estas partículas que acaba por provocar perturbações no solo contíguo. A acrescentar, o facto de as paredes do tubo de amostragem serem finas, torna-o propício a danos. Quando não é utilizado neste tipo de materiais, possibilita a realização de ensaios de densidade natural seca de solos arenosos, análise granulométrica e ensaios de identificação para além do exame visual da estrutura do estrato.

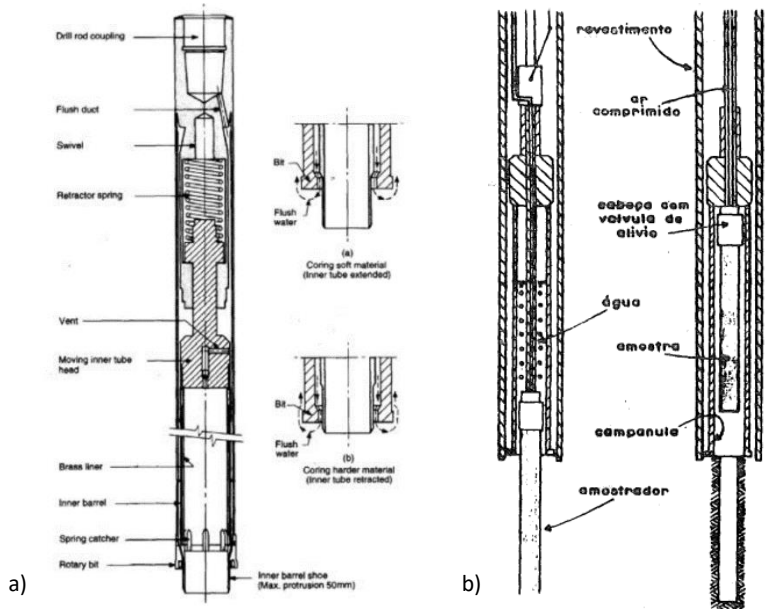


Figura 5: Amostradores para solos arenosos: a) Amostrador *Mazier* (Cordeiro, 2018) e b) Amostrador *Bishop* (Nogueira, 1977).

Sempre que o terreno onde decorrerá a amostragem apresenta alternância entre solos de consistência mole e consistência dura, é usual optar-se pelo amostrador do tipo *Pitcher* (Figura 6 a)). Este é constituído por um tubo exterior rotativo com um bit e por um tubo interior estacionário onde a pressão é transmitida por uma mola que guia o tubo exterior permitindo atravessar formações mais resistentes com o auxílio da coroa rotativa que efetua o corte (Lima & Menezes, 2008).

No caso de se amostrar solos duros a rijos, o amostrador ao qual se deve recorrer é o do tipo *Denison* (Figura 6 b)). Este é muito semelhante ao amostrador anterior, mas ao invés de recorrer a uma mola para ajustar o tubo exterior, este é realizado manualmente. Amostras de qualidade são obtidos através de cabeças cortantes independentes com avanço combinado com penetração por rotação. O amostrador em causa pode ainda ser útil na recolha de solos incoerentes por constituírem uma válvula retentora na extremidade que impede a saída do material amostrado (Lima & Menezes, 2008).

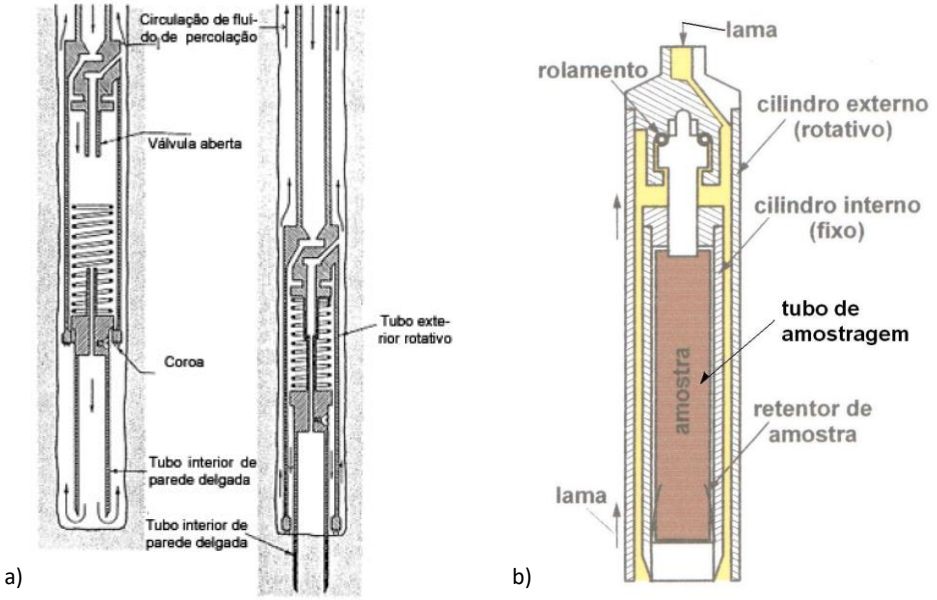


Figura 6: Amostradores de solos: a) Amostrador *Pitcher* (Lima & Menezes, 2008) e b) Amostrador *Denison* (Viana, 2016).

Por fim, é fundamental fazer-se referência à recolha de amostras remexidas dado que é muito frequente em ambiente de obra. A recolha deste tipo de amostras pode ser feita manualmente ou com recurso a máquinas escavadoras. Se o material for relativamente homogéneo, a amostragem poderá ser bem executada manualmente, ou com auxílio de uma máquina escavadora; no entanto, quando se trata de maciços estratificados, recomenda-se a recolha com equipamentos manuais devido à possível mistura de camadas de diferentes características geológico-geotécnicas.

As amostras desta natureza são colhidas a partir da base ou paredes de poços de prospeção, de *cuttings* provenientes de perfuração, de um buraco realizado com recurso a equipamento manual (como, por exemplo, pás), por meio de uma retroescavadora ou recolhidas de uma pilha de armazenamento. O material, assim que extraído, deve ser colocado num recipiente com capacidade de reter as partículas de todas as dimensões, nomeadamente: baldes de plástico ou metal, sacos de plásticos e de ráfia que possam ser selados de forma a manter o teor em água natural das amostras.

2.3. Métodos de obtenção do teor em água

O número de técnicas existentes para a obtenção do teor em água é vasto, mas é possível agrupá-las pela forma como é feita a medição da quantidade de água presente em determinada amostra em dois grandes grupos: métodos diretos e indiretos.

O método direto corresponde aquele em que o conteúdo de água é medido por meio da sua remoção, que é feita maioritariamente por evaporação da água existente. Pertencem a este grupo o método gravimétrico (secagem em estufa), do aquecimento direto, combustão de álcool, *speedy*, micro-ondas, banho de areia e ainda balança de torção por infravermelhos

Enquanto nos métodos indiretos, a medição passa pelo recurso a alguma propriedade física ou físico-química do solo que seja proporcional à quantidade de água. Estes tipos de técnicas exigem curvas de calibração para o equipamento e apresentam como vantagens o facto de serem não destrutivos e de necessitarem de menos tempo e trabalho na execução (Lucas, 2019; Ribeiro et al., 2018). São exemplos: o método nuclear, do picnómetro, *Dual needle heat pulse* (DNHP) – "pulso térmico de agulha dupla", resistência elétrica e capacitância (reflectometria de domínio temporal (TDR) e domínio de frequência (FDR)).

2.3.1. Método gravimétrico ou secagem em estufa

O método de obtenção do teor em água padrão, em Portugal, é o de secagem em estufa. O procedimento de ensaio é ditado pela norma NP 84:1965, que define teor em água como sendo, e passando a citar, "o quociente, expresso em percentagem, da massa da água que se evapora do provete entre 105 e 110 °C, pela massa do provete depois de seco" (NP-84, 1965) e serve como meio de calibração de todas as restantes técnicas existentes. É um método de medição direta, simples e que consegue ser pouco dispendioso. Contudo, inclui-se no grupo dos métodos destrutivos, não tendo em conta a variabilidade temporal, exige uma balança e estufa com elevada precisão e é um ensaio que requer muito tempo (Campbell, 2014).

<u>Equipamento</u>

A realização do ensaio, necessita do seguinte equipamento:

i. Recipientes de amostras;
   De boca larga e resistente à humidade e ao calor, como por exemplo:
   - tabuleiro;
   - cápsula metálica.
ii. Balanças (com sensibilidade a 0,01 e 0,1 g);
iii. Estufa (para secagem a 105 a 110 °C, e
iv. Exsicador com sílica-gel.

Considerações gerais e preparação da amostra

Para a realização de qualquer ensaio laboratorial é fundamental que se recorra a amostras representativas do material, sendo este um aspeto crucial nos métodos de obtenção do *w*. Um outro fator a ter em conta, para que os resultados obtidos sejam os mais fiáveis, é o correto acondicionamento da amostra em recipientes herméticos não corrosivos numa área com pouca exposição solar se, por qualquer motivo, o ensaio não possa ser realizado de imediato, para que não se deem trocas de humidade entre o provete e a atmosfera. Se estas condições não se cumprirem, deverá ser feito o registo de tal informação. Deve ainda ter-se em atenção à composição da amostra em que vai ser aplicado este método visto que a temperatura de secagem deverá ser reduzida a 80 °C se esta apresentar gesso na sua constituição.

Previamente à execução do ensaio, deve-se desagregar o provete de modo que a secagem deste seja o mais uniforme possível e esquartelar o material de modo a obter as massas mínimas indicadas na norma do ensaio (Quadro 1) (NP-84, 1965).

Quadro 1: Massas mínimas para realizar ensaio de teor em água em estufa (NP-84, 1965).

Mais de 80 % da massa das partículas passa no peneiro com malha (mm)	Massa mínima do provete (g)
2,38 (nº 8)	30
19,1 (¾")	300
37,5 (1 ½")	2000

Medidas de segurança

As medidas de segurança necessárias a aplicar são as comummente associadas ao manejo de utensílios a elevadas temperaturas, sendo estas: a utilização de luvas de proteção ao calor ou suporte adequado ao manuseio de recipientes a elevadas temperaturas.

Procedimento

A realização do ensaio engloba o seguinte conjunto de operações:

1. Secar e pesar o recipiente;
2. Desagregar o provete e colocá-lo no recipiente o mais rápido possível a fim de evitar as trocas de humidade; e
3. Pesar o conjunto e introduzi-lo na estufa a secar à temperatura de 105 a 110 °C, até que a diferença entre pesagens efetuadas a intervalos de sensivelmente 4 h não seja superior a 0,1 % da massa inicial da amostra.

   Observação: Em cada pesagem, deve tapar-se o recipiente antes de o retirar da estufa e deixar arrefecer no exsicador se o provete tiver granulometria inferior a 2,38 mm.

Para grande parte dos provetes ensaiados, é suficiente secar por 16 a 24 h (NP-84, 1965).

Cálculo

O valor do teor em água é obtido por aplicação da seguinte equação.

$$w = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100 \qquad \text{Equação 1}$$

Onde,

w – teor em água, %;
m_1 – massa do recipiente, g;
m_2 – massa do recipiente com o solo húmido, g;
m_3 – massa do recipiente com o solo seco, g.

Relatório de ensaio

O relatório de ensaio deve incluir os seguintes aspetos:

- Identificação da amostra ensaiada, mencionando o nº da mesma ou nº de ensaio;
- Teor em água mais próximo de 0,1 ou 1 %, dependendo do objetivo do ensaio;
- Indicar a massa da amostra total a ensaiar e discriminar se a mesma apresenta valor inferior ao mínimo indicado;
- Indicação relativa à possibilidade de existir mais que um tipo de solo no provete (no caso de haver estratificação);
- Indicação sobre a exclusão de qualquer material do ensaio e descrição do mesmo;
- Massa inicial do provete antes da secagem; e
- Massa do provete arrefecido após secagem completa do material.

Acrescenta-se que, caso se tenha a indicação, deve-se incluir a informação relativa às condições climatéricas na altura da recolha da amostra.

2.3.2. Aquecimento direto

Um outro método direto de obtenção do teor em água consiste na aplicação direta de calor a temperaturas superiores a 110 °C na amostra, com recurso a uma placa de aquecimento, fogão a gás ou fogareiro, maçarico, lâmpadas de calor, etc. Não sendo apropriada a aplicação direta de

calor por chama. Esta técnica denomina-se de método do aquecimento direto e encontra-se descrita na norma ASTM D4959-00.

A teoria base do procedimento do ensaio é bastante semelhante ao método da secagem em estufa, isto é: determinar a massa da amostra a ensaiar com a humidade natural que lhe está associada seguida da secagem da amostra, sendo neste caso através do aquecimento direto da mesma. Por fim, efetua-se nova pesagem e o processo é repetido até que o peso determinado seja constante. Segundo a norma, este procedimento pode ser aplicado em substituição do método padrão quando são desejados resultados mais rápidos e não há a necessidade de estes serem tão precisos (ASTM D4959-00, 2000; Berney IV et al., 2011)

Considerações gerais e limitações

Apesar deste ensaio poder ser utilizado em substituição do principal método de obtenção do teor em água, é importante reforçar que este pode não ser apropriado quando é fundamental obter resultados com elevada precisão, ou quando os dados são extremamente sensíveis a variações de humidade, uma vez que diversos fatores podem ter influência nos resultados obtidos.

O comportamento do solo perante a aplicação desta técnica está dependente da composição mineralógica do material a ensaiar, pelo que, apesar da grande diversidade de solos que podem ser sujeitos à execução do método em questão, certos materiais não são recomendados, sendo estes: solos constituídos por elevadas quantidades haloisite, micas, montmorilonite, gesso e, ainda, solos onde a água localizada nos poros possa conter iões dissolvidos, pois poderão levar a resultados pouco fiáveis. Para além disso, não é ideal executar esta técnica em amostras que apresentem uma percentagem considerável de matéria orgânica inflamável ou com contaminantes; e a solos mais grosseiros, como areias e cascalhos para evitar que as partículas de quebrem.

Potencialmente, a maior objeção a este método reside na possibilidade de ocorrer sobreaquecimento do solo, originando duas principais consequências: resultados menos precisos, uma vez que os teores em água obtidos poderão ser mais elevados que o esperado; e a alteração das características físicas do material, nomeadamente desagregação de partículas individuais, vaporização, transição química e perda de matéria orgânica, o que impossibilita desde já a utilização do material seco a partir de aquecimento direto para a realização de outros ensaios. Esta questão pode ser minimizada quando se opta por um equipamento que permita configurar a temperatura a que o material vai estar sujeito.

É ainda imperativo ter em consideração que o material não deve ser aquecido diretamente por chama aberta, pois tal pode causar a degradação do material assim como a sua oxidação (ASTM D4959-00, 2000).

Equipamento

A técnica de secagem por aquecimento direto do provete recorre aos seguintes instrumentos:

i. Fonte de aquecimento direto (com capacidade de atingir temperaturas de 110 °C ou superiores, com exceção do recurso a chama aberta diretamente no solo. Assim, tem-se com exemplos: fogões elétricos, a gás butano ou a óleo, placas de aquecimento, maçaricos, lâmpadas de calor, secadores de cabelo, aquecedores, etc;
ii. Balanças (com capacidade mínima de 2000 g e com legibilidade de 0,1 g);
iii. Recipientes de amostras (constituídos por um material que seja resistente à corrosão e à alteração da massa após repetição dos processos de aquecimento, arrefecimento e limpeza);
iv. Ferramentas de agitação (nomeadamente: espátulas e colheres); e
v. Equipamento de proteção (como luvas de proteção ao calor ou suportes adequados para retirar os recipientes quentes após a secagem do material e óculos de segurança para proteção dos olhos) (ASTM D4959-00, 2000).

Preparação e acondicionamento da amostra

A preparação e acondicionamento das amostras para a realização deste ensaio apresenta os mesmos detalhes que a preparação necessária para a obtenção do teor em água por secagem em estufa, com a exceção das massas de material a ensaiar, que devem seguir as seguintes indicações:

- Amostras a granel e amostras reduzidas de solos não coesivos devem ser bem misturados e a quantidade de amostra deve ser de acordo com o Quadro 2; e
- Nas amostras reduzidas de solos coesivos deve-se remover cerca de 3 mm de material da periferia exposta e dividir a restante porção a meio de modo, a verificar se o material se encontra estratificado. Se tal acontecer, seleciona-se uma porção média ou porções individuais, ou até mesmo ambas, e toma-se nota das porções ensaiadas e dos seus resultados. Caso apresentem partículas de dimensões mais grosseiras, deve-se seguir a indicações do Quadro 2.

Quadro 2: Massas recomendadas de amostras a usar no método do aquecimento direto (ASTM D4959-00, 2000).

Material retido no peneiro inferior a cerca de 10% da amostra (mm)	Massa recomendada da amostra húmida (g)
2,0 (nº 10)	200 a 300
4,75 (nº4)	300 a 500
19 (3/4 in.)	500 a 1000

É também possível ensaiar amostras com massas menores que as estipuladas no quadro apresentado, se tal for adequado para o estudo, devendo essa opção estar indicada no relatório de ensaio.

Quando se pretende comparar os resultados obtidos com outras técnicas de determinação de *w*, nomeadamente o método padrão de secagem em estufa, deve-se preparar uma segunda amostra para a realização de um ensaio a partir do método com o qual se deseja comparar (ASTM D4959-00, 2000).

Medidas de segurança

É necessário assegurar sempre a segurança do técnico operador, portanto, durante a execução deste ensaio deve-se:

- Utilizar luvas de proteção ao calor ou suporte adequado para o manuseio dos recipientes quentes;
- Proteger adequadamente os olhos com a utilização, por exemplo, de óculos de segurança, devido à possibilidade de fragmentação de partículas durante o processo de aquecimento, mistura ou determinação das massas das amostras, e
- Realizar o ensaio num espaço devidamente ventilado (ASTM D4959-00, 2000).

Procedimento

O seguinte conjunto de operações descreve como deve ser executado o ensaio deste método:

1. Determinar a massa de um recipiente limpo e seco;
2. Colocar a amostra no recipiente e, de forma imediata, determinar e registar a massa;
3. Aplicar calor no recipiente, tendo o cuidado para evitar sobreaquecimento localizado, e mexer a amostra de forma a obter uma distribuição uniforme do calor até que esta aparente estar seca (ASTM D4959-00, 2000). Uma forma de perceber se a mesma já se encontra seca consiste em segurar uma superfície de vidro acima do recipiente que a contém e verificar se fica embaciada. Se tal acontecer, a amostra ainda apresenta humidade, caso contrário, esta já se encontrará seca (Schreiner & Rodrigues, 2018);
4. Assim que o solo estiver aparentemente seco, remover o recipiente da proximidade da fonte de calor e deixar arrefecer. Determinar e anotar a massa do solo e recipiente;
5. Colocar novamente o recipiente com a amostra na fonte de calor para novo aquecimento e remexer cuidadosamente o solo; e

6. Repetir os procedimentos descritos entre os pontos 3 e 5 até que a diferença obtida entre as determinações de massa de amostras sucessivas seja insignificante para o cálculo do teor em água (valores na ordem de 0,1 % são aceitáveis) (ASTM D4959-00, 2000).

Cálculo

A obtenção do teor em água através deste método corresponde à Equação 1.

Relatório de ensaio

O relatório de ensaio deve incluir os aspetos referidos no método padrão com acréscimo dos seguintes:

- Indicação da fonte de aquecimento utilizada, configurações aplicadas, tempos de secagem e, se for o caso, número de ciclos aplicados; e
- Identificação de ensaios de comparação, quando estes são realizados, assim como o método comparativo escolhido (ASTM D4959-00, 2000).

Precisão e enviesamento

A precisão de qualquer ensaio é influenciada pelo operador que o realiza e pela atenção e cuidado com que o executa, bem como pelo tipo de solo e equipamento utilizado. Devido à dificuldade e custo associado à determinação deste parâmetro, a norma não a traduz por números concretos.

No entanto, existem alguns estudos comparativos que permitem aferir o rigor e fiabilidade dos resultados obtidos por este método, sendo alguns destes apresentados de seguida.

Gomes, Fernandes e Sarmento (2017) realizaram um estudo comparativo entre diversos métodos, nomeadamente: o de aquecimento direto (com recurso a um fogareiro a gás e uma frigideira), o de secagem por estufa, entre outros. O solo abordado é denominado de "argilossolo vermelho[1]" e para a análise comparativa, foram adicionadas quantidade de água definidas (4, 8, 12 e 16 % do peso da amostra) a amostras de 30 e 100 g para secagem em estufa e com recurso a uma frigideira levada a um fogareiro, respetivamente. Gomes et al. (2017) admitem que o desempenho da técnica está associado ao tipo de solo em estudo e indicam que apesar de os resultados do *w* obtidos por aquecimento direto apresentarem uma correlação relativamente elevada com os valores da secagem por estufa, existe alguma discrepância entre eles. Autores acreditam que esta diferença

[1] Solo constituído por material mineral que apresenta um horizonte textural A, ou E, e imediatamente de seguida um B com argila com mais ou menos atividade (Neto & António de Almeida, 2013).

nos valores se deva à remoção não só da humidade superficial, mas também à água intersticial nas partículas mais finas (Faria et al., 2017).

Um estudo mais abrangente foi realizado por Berney, Kyzar e Olyelam (2011), onde através de 7 tipos de solos com classificações diferentes (CH, ML (2), SP, SP-SC, SM e GP-GM, segundo a classificação unificada) foram comparadas as performances de 8 equipamentos distintos, nomeadamente a estufa, fogão a gás portátil e um analisador de humidade[2]. O estudo, que pretendia não só analisar a exatidão como também a precisão dos métodos, concluiu que a técnica que recorre ao fogão e à frigideira é a melhor candidata quando se trata de ensaios a serem realizados *in situ,* e que esta tem a capacidade de fornecer uma fonte de energia constante. Indicando, assim, que a secagem da amostra por este meio é consistente e previne o sobreaquecimento, contrariando o método do micro-ondas (abordado no ponto 2.3.5. deste documento) e assemelhando-se mais ao da secagem por estufa. Para além disso, os autores apontam o facto de este ser um procedimento com recurso a poucos instrumentos, sendo que os mesmos são pequenos e portáteis. Relativamente ao analisador de humidade, os autores concluíram que este não fornece resultados fiáveis para toda a gama de solos estudados. Apesar de a fonte de calor ser consideravelmente quente para secar solos mais grosseiros (areias e cascalhos) esta não fornece energia suficiente para secar os solos de granulometria mais fino (siltes e argilas). Concluiu-se, então, que o analisador de humidade só deve ser utilizado para a determinação do teor em água de solos mais grosseiros e que a técnica de aquecimento direto através de um fogão a gás é a primeira a ser recomendada para realização do ensaio em campo e como possível substituição do método de secagem em estufa (Berney IV et al., 2011).

Por fim, apresenta-se o estudo realizado por Rasti, Pineda e Razavi (2020) que dão indícios de serem pioneiros no estudo da determinação do teor em água através de um analisador de humidade de halogénio (HMA). Esta é uma técnica de aquecimento direto com estimação rápida do teor em água que recorre a uma lâmpada de halogénio para secar uma amostra de solo enquanto uma balança, já incorporada no equipamento, determina a massa decrescente da amostra por perda de humidade. Deve ainda mencionar-se que este é um equipamento relativamente novo no que diz respeito a laboratórios de mecânica dos solos, visto que, à semelhança do analisador de humidade anteriormente referido, é principalmente utilizado pela indústria farmacêutica, de plásticos e de comida. O estudo foi feito com areias, argilas e misturas entre ambas e consistiu na análise dos resultados obtidos por diferentes quantidades de água num tipo de solo e em misturas de argila

[2] dispositivo de secagem de mesa através de aquecimento cerâmico, concebido sobretudo para a aplicação nas indústrias agrícola e farmacêutica, e que já inclui uma balança e um recipiente para a colocação da amostra (Berney IV et al., 2011).

com diferentes percentagens de areia (10 a 100 %). Desta forma, foi constatado que os tempos de secagem no HMA aumentam com a quantidade de água presente nas amostras quer de areia, quer nas misturas, e que apesar de o tempo de secagem em argilas ser cerca de 10 % maior que o das areias, os tempos de secagem aferidos foram rápidos e inferiores a 60 minutos. Posto isto, percebe-se que os tempos de secagem, com recurso ao HMA, são significativamente mais rápidos, especialmente nas areias. Para além disso, os resultados obtidos para o teor em água por ambos os métodos mostraram ter uma relação perfeitamente positiva para ambas as tipologias de solo. Os autores terminam, enunciando algumas vantagens da técnica e do equipamento, entre as quais: o automatismo de todo o processo, que minimiza possíveis erros; ser energeticamente eficiente, uma das consequências de ser um processo automático (visto que assim que a amostra estiver seca, o equipamento dá a leitura e deixa de fornecer energia desnecessária); e por fim, ser um equipamento único capaz de realizar todo o processo, para além de este ser também portátil (Rasti et al., 2020).

2.3.3. Método da combustão do álcool

O método do álcool, que corresponde a mais um dos métodos diretos de obtenção do teor em água, consiste da adição de álcool a determinada amostra de solo e posterior combustão deste permitindo assim obter a massa seca do material ensaiado e o seu teor em água pela relação entre a massa da amostra húmida com a massa da amostra seca (Ribeiro, 2008; Passos Braga et al., 2017; Nunes, 2014).

<u>Considerações gerais e limitações</u>

Como em qualquer ensaio, é necessário ter em atenção certos pontos, quer na execução do ensaio, quer na análise dos resultados do mesmo. E neste caso, a primeira consideração a ter em conta é a escolha do álcool a utilizar para a execução do ensaio, visto que este necessita de apresentar uma pureza de pelo menos 95 % (Liang & Hu, 2020) e, devido à combustão do mesmo ter como resíduo a água, este deve ser não hidratado (Nunes, 2014).

O processo de combustão por si só apresenta também enumeras limitações. Nomeadamente o facto de não ser possível garantir temperatura constante durante todo o processo. Para além disso, a quantidade de álcool utilizada e o número de queimas realizadas afeta diretamente a fiabilidade dos resultados. Isto é, visto que a combustão do álcool tem como produto a água, se a quantidade de álcool utilizada não for controlada, a água gerada depois da combustão irá transmitir a ideia de que a qualidade do solo é superior à que este realmente apresenta por resultar num teor em água

mais baixo. Por este motivo, como já referido, deve-se optar por um álcool não hidratado. O número de combustões realizadas é também um ponto fundamental a ter em consideração aquando da realização do ensaio na medida em que a queima excessiva poderá provocar a destruição da matéria orgânica do solo. Se o solo em estudo apresentar uma quantidade de matéria orgânica significativa, os resultados obtidos para o teor em água serão mais elevados e, por este motivo, neste tipo de solos não é recomendada a aplicação deste método para a determinação do *w*. A secagem de solos argilosos pode representar uma limitação, não só porque a secagem de materiais com elevados teores em água é mais difícil (Liang & Hu, 2020), mas também pela possibilidade de "*cracking*" em partículas de argilas pelo facto de não ser possível controlar a temperatura a que o material fica exposto (Nunes, 2014).

Por fim, tendo em conta a possibilidade de alteração de algumas das características do material, não se recomenda a utilização das amostras ensaiadas para outros fins ou ensaios.

Equipamento

Os seguintes instrumentos servem de auxílio à execução do método do álcool.

i. Álcool, com pureza igual ou superior a 95 %;
ii. Isqueiro ou outra fonte de chama para iniciar a combustão do álcool;
iii. Balanças (com capacidade mínima de 2000 g e com sensibilidade de 0,1 g);
iv. Recipientes de amostras (por exemplo, cápsulas metálicas);
v. Ferramentas de agitação (nomeadamente espátulas); e
vi. Equipamento de proteção (como luvas de proteção ao calor ou suportes adequados, para manuseio dos recipientes quentes após a secagem do material) (Liang & Hu, 2020).

Preparação e acondicionamento das amostras

Não há exigências particulares a este método no que diz respeito à preparação e acondicionamento das amostras. No entanto, e como em qualquer ensaio desta natureza, a amostra a ser ensaiada deve ser representativa e o ensaio deve ser realizado o mais rápido possível de modo que nenhuma água se seja perdida uma vez que tal poderia adulterar os resultados.

Medidas de segurança

É fundamental proceder com todas as medidas de segurança adequadas de modo a prevenir acidentes ao operador do ensaio e, como em qualquer ensaio que envolva combustões e, por consequência o manuseio de materiais a elevadas temperaturas, sugerem-se as medidas mencionadas no método anterior.

Procedimento

O seguinte conjunto de operações descrevem o procedimento a desenvolver para a obtenção do teor em água pelo método da combustão do álcool:

1. Determinar a massa de um recipiente limpo e seco;
2. Colocar a amostra no recipiente e, de forma imediata, determinar e registar a massa;
3. Adicionar por cada grama de solo um mililitro de álcool à amostra e misturar até homogeneizar o material (Barbosa et al., 2018; Maurya, 2022);
4. Iniciar combustão do álcool e deixar que esta termine por completo;
5. Deixar arrefecer e pesar a amostra; e
6. Repetir o procedimento descrito em 4 e 5 até não haver alteração significativa da massa (Nunes, 2014).

Cálculo

O valor do teor em água é obtido pela Equação 1 já mencionada.

Relatório de ensaio

No relatório de ensaio devem estar incluídos os seguintes aspetos referidos no método padrão devendo ser acrescentada a identificação de ensaios de comparação, quando estes são realizados, assim como o método comparativo escolhido.

Precisão e enviesamento

Ao longo do tempo têm sido realizados alguns estudos para averiguar a precisão e fiabilidade deste método e, de um modo geral, os resultados são positivos.

Passos Braga et al (2015) aplicaram o método do álcool, assim como outros, em argilas siltosas e areias puras com o objetivo de definir qual a técnica mais confiável e viável. Neste estudo foram realizadas cinco determinações de teor em água por cada método para cada variação (*w* natural e de 5, 10 e 15 %) e obtiveram, de um modo geral, bons resultados, com um coeficiente de determinação muito próximo de 1, quer para teores em água baixos como elevados. Tendo as principais diferenças surgido quando a combustão do álcool foi realizada em materiais com matéria orgânica e em argilas siltosas. Os autores realçam que a presença da matéria orgânica assim como de gases levantou algumas questões de segurança devido à formação de bolhas e, por consequência, de explosões, tendo concluído que, de entre os métodos avaliados (*speedy*, micro-

ondas e álcool) este foi o que obteve melhores resultados, desde que estes elementos não estejam presentes (Passos Braga et al., 2017).

Schreiner e Rodrigues (2018) também estudaram o rigor com que o método do álcool determina o teor em água, mas apenas em solos arenosos com poucos finos. Foram realizadas 5 determinações com 50 g de solo em cada amostra nas quais foi adicionado álcool 92,89 % até cobrir toda a amostra, tendo o processo de combustão sido repetido três vezes. Apesar de o álcool não apresentar pureza superior a 95 %, nem de a quantidade de álcool ser muito controlada, à semelhança do estudo anterior, este também foi o procedimento com melhores resultados, isto é, com os valores mais próximos dos obtidos pela secagem em estufa (Schreiner & Rodrigues, 2018).

Barbosa et al (2018) com o intuito de averiguarem a semelhança entre os métodos, realizaram o estudo em quatro amostras de solos. Apesar de não indicar a classificação exata do material, os autores indicam que este não apresenta elevadas quantidades de matéria orgânica e que o mesmo foi peneirado tendo passado no peneiro nº 200. As amostras foram depois dividas em amostras de 25 g para a comparação das técnicas. A procedimento passou por adicionar 1 ml de etanol (utilizado para o uso em veículos) a cada grama de solo que, após mistura, sofreu combustão, tendo o processo sido repetido três vezes. Também neste estudo os resultados foram positivos apresentando, à semelhança de outros já mencionados, um coeficiente de correlação muito próximo de um, revelando a contiguidade dos resultados obtidos entre o método do álcool e o da secagem em estufa. Por fim, os autores concluíram com segurança que o teor em água pode ser estimado corretamente através da combustão de álcool, tendo-se mostrado uma alternativa rápida, prática e eficiente (Barbosa et al., 2018).

Finalmente, Liang e Hu (2020) realizaram um estudo semelhante em solos arenosos e argilosos em amostras de 10, 20, 25, 30 e 40 g e com diferentes teores em água com variações entre 10 e 50 %. O material foi colocado numa caixa com nível de líquido livre que determinou a quantidade de álcool adicionada a cada amostra, tendo sido realizadas pesagens ao fim da 2ª, 3ª e 4ª combustão. Os autores concluíram que na segunda combustão o *w* obtido foi menor que o determinado pela secagem do material em estufa, mas que na terceira os resultados foram muito próximos um do outro. No entanto, os valores registados após a quarta queima foram menores que os da terceira. Tal é justificado pelo facto de água ser um dos produtos da combustão do álcool, ou seja, com as sucessivas combustões há a produção de água, que levará ao aumento aparente da qualidade do solo devido à diminuição do *w*. Sendo o controlo da quantidade de álcool feito pela caixa de nível de líquido livre e com um número de combustões igual a três, os autores afirmam que é fiável substituir temporariamente o método da secagem em estufa pelo método do álcool para obter o

teor em água *in situ* em solos argilosos e arenosos uma vez que: os resultados obtidos foram válidos, pela facilidade com o ensaio é realizado e pela redução no tempo de obtenção do parâmetro (Liang & Hu, 2020).

2.3.4. Método do speedy ou método do carbureto de cálcio

A obtenção do teor em água através do método do *speedy* encontra-se descrita na norma ASTM D4944-04 e consiste em fazer reagir uma amostra de solo húmido com carbureto de cálcio no interior de um equipamento denominado de garrafa *speedy*, ou simplesmente *speedy.* A água quando entra em contacto com o reagente dá origem à libertação de gás acetileno que tem como resultado o aumento da pressão no interior do instrumento, sendo a partir desta pressão que é então obtido o *w* da amostra em questão. Assim, pressupõe-se que a pressão é proporcional à quantidade de água presente no solo amostrado, isto é: quanto maior for a quantidade de água presente no solo amostrado, maior será a pressão lida no equipamento.

Este método direto é essencialmente utilizado quando é necessária a obtenção rápida de um teor em água ou quando não é prática a utilização de uma estufa, reservando-se este meio de obtenção para ensaios *in situ* (ASTM D4944-04, 2004; Ribeiro, 2008; Brito, 2006; Santos, 2008).

<u>Considerações gerais e limitações</u>

Para a realização deste ensaio é necessário ter em consideração diversos aspetos, relativos quer ao ensaio propriamente dito, quer em relação aos instrumentos utilizados.

No que diz respeito aos instrumentos utilizados para a realização do ensaio, é preciso ter especial atenção ao reagente, visto que é recomendado que este seja comprado em pequenas quantidades e em recipientes fechados hermeticamente. Para além disso, este deve ser armazenado sempre num local seco e mantido fechado até ser utilizado, não só por uma questão de segurança, mas também para preservação da qualidade do mesmo, uma vez que este se deteriora com a exposição à atmosfera. Aconselha-se ainda o total uso de um recipiente completo antes de abrir um novo e a compra periódica do mesmo.

Antes da realização deste ensaio é importante analisar o material que se pretende ensaiar na medida em que este teste está limitado a amostras de solo de 20 g ou mais, tendo ainda em atenção de que as partículas constituintes da mesma não devem apresentar tamanho superior ao peneiro padrão nº 4 (4,75 mm). É possível as realizações do ensaio com amostras menores, no entanto, apresentam pouca precisão (ASTM D4944-04, 2004). Ainda relativamente à amostra a ser ensaiada, e como em qualquer ensaio realizado, é imperativo que esta seja representativa.

Para que o ensaio seja o mais fiável e preciso possível, deve-se ainda: verificar se o corpo e a cápsula do equipamento estão perfeitamente limpos e que não contêm nenhum vestígio de reagente ativo de um teste realizado anteriormente; ter a certeza de que as bolas de aço são usadas quando se ensaia argilas; e, por fim, que o material e o reagente não entram em contacto até que a cápsula esteja firmemente presa ao corpo.

Um último ponto a considerar é a temperatura. O equipamento deve ser utilizado num ambiente cuja temperatura seja aproximadamente 20 °C. Se a temperatura for abaixo de 15 °C, ignora-se o primeiro ensaio e possivelmente o segundo. Finalmente, se após a realização de um ensaio o *Speedy* estiver quente deve-se esfregá-lo cuidadosamente de modo a arrefecê-lo.

Equipamento

Os instrumentos necessários à realização são os seguintes:

i. Recipiente de pressão com manómetro, *Speedy* (Figura 7 a));
ii. Balança, para pesar o material (Figura 7 b));
iii. Pequena colher, de modo a medir a quantidade de reagir a utilizar;
iv. Bolas de aço, a usar em materiais mais argilosos e outros materiais mais grosseiros;
v. Pano e pincel, para limpeza dos instrumentos;
vi. Peneiro nº 4 (4,75 mm), de modo que o material amostrado cumpra os requisitos de amostragem; e
vii. Carbureto de cálcio, usado como reagente (ASTM D4944-04, 2004).

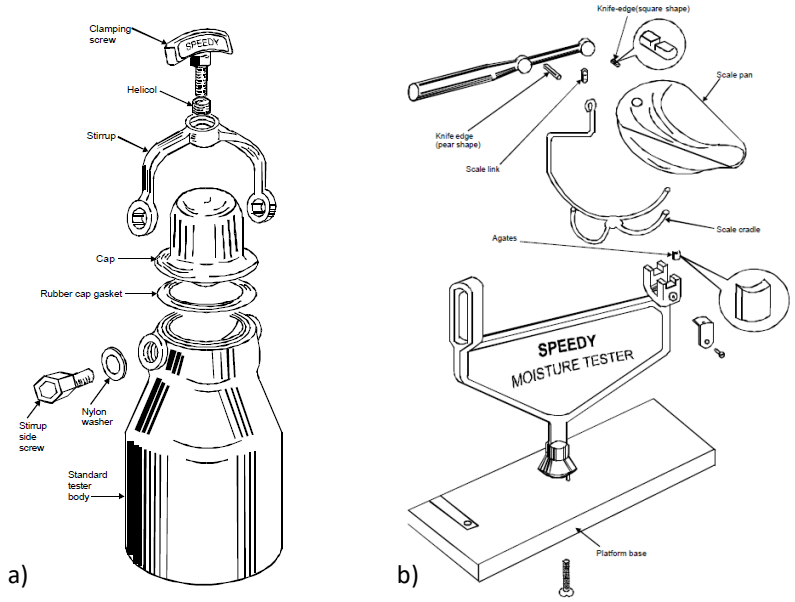


Figura 7: Método do speedy: a) garrafa speedy; b) balança (adaptado de Haque, 2001).

Preparação das amostras

A determinação do *w* a partir deste ensaio requer a preparação de alguns materiais, nomeadamente de argilas, solos ou de materiais mais grosseiros. Nestes casos, deve-se usar o método das bolas de aço. Este método consiste em colocar as bolas de aço dentro do corpo do *Speedy* juntamente com o reagente, devendo o processo de agitação descrito no procedimento do ensaio ser realizada da seguinte forma: segurar o *Speedy* horizontalmente, rodando-o durante aproximadamente 10 segundos de maneira a que as bolas de aços entrem em trajetórias circulares dentro do equipamento; parar o movimento por 20 segundos e repetir os movimentos de rotação até o resultado ser constante (normalmente, durante 3 minutos). Areias e pós finos, não necessitam de preparação.

Existe ainda o método proporcional que deve ser aplicado quando vão ser determinados teores em água elevados ou reduzidos comparativamente ao dito normal. Assim, quando se pretende obter uma leitura superior ao valor máximo do manómetro deve-se utilizar um pequeno peso (metade do peso normal) que é colocado junto ao suporte do prato de pesagem. De seguida, ensaia-se o material, que agora é apenas metade do peso normal, de forma habitual. Deve ter-se em consideração que se deve dobrar a percentagem lida no manómetro, isto é, se o manómetro lê 18 %, o *w* será duas vezes o indicado, ou seja, igual a 36 %. No caso de os teores serem reduzidos, é possível ensaiar duas, ou mais, quantidades completas de material de uma só vez. Neste caso, o valor lido no manómetro terá de ser dividindo pelo número de quantidades completas introduzidos no equipamento. Isto é, se duas pesagens resultaram num teor em humidade de 1,8 %, o valor final lido no *speedy* será de metade, ou seja, 0,9 %.

Medidas de segurança

Qualquer ensaio realizado deve ter sempre em conta todas as questões de segurança, sobretudo quando este implica uma reação química. Assim, devem ser tomadas as seguintes medidas:

- Apenas testar materiais para o qual o *Speedy* foi construído;
- O equipamento deve ser guardado num local protegido, seco e ventilado;
- Manter o reagente fechado;
- O ensaio não deve ser executado em espaços fechados ou perto de fontes de ignição. Em caso de fogo, utilizar areia seca ou um extintor de químico seco, nunca utilizar água;
- Não é aconselhável a realização do ensaio em solos excessivamente húmidos ou o uso inapropriado do equipamento, uma vez que tal pode levar ao atingimento de elevadas

pressões por parte do dispositivo, o que poderá resultada na danificação deste ou até mesmo na insegurança do operador;

- É necessário ter especial cuidado com a quantidade de reagente que se aplica no ensaio e no que se descarta, pois, uma vez que este entre em contacto com a água, poderá produzir um gás explosivos;
- O operador deve usar equipamento de segurança entre os quais: máscara, roupa com mangas compridas, luvas e óculos para impedir que o reagente provoque qualquer tipo de reação no sistema respiratório, nos braços, mãos e olhos; e
- Após o ensaio, aliviar a pressão lentamente e longe dos olhos (ASTM D4944-04, 2004).

Procedimento

O procedimento engloba as seguintes operações:

1. Remover a tampa e colocar a quantidade recomendada de reagente (juntamente com as bolas de aço, se a utilização destas for necessária);
2. Colocar a balança na vertical de modo a obter a quantidade de solo recomendada, que será atingida quando as marcas vermelhas na balança e na haste que segura o copo coincidirem;
3. Colocar a amostra de solo no interior do equipamento e, com este na horizontal, inserir a tampa e fechar bem o mesmo;
4. Ter cuidado para que o reagente não entre em contacto com a amostra até ter a certeza de que o equipamento está bem fechado;
5. Colocar o dispositivo na vertical e agitar vigorosamente com movimentos de rotação com o intuito de que as bolas de aço, a serem utilizadas, se desloquem ao redor da circunferência do equipamento, de modo a efetuar a moagem do solo e do reagente;
6. O tempo de agitação deve ser de pelo menos 1 minuto para amostras de solos arenosos, e aumentado para 3 quando os materiais apresentam uma componente mais argilosa;
7. Fazer a leitura da pressão quando a agulha de medição estiver estabilizada e o calor produzido pela reação química dissipado;
8. Com a tampa do equipamento apontada na direção contrária à do operador, aliviar lentamente a pressão do aparelho;
9. Se o material não estiver completamente pulverizado, o ensaio deve ser repetido com nova amostra; e
10. Limpar o corpo e a tampa do equipamento e deixar o mesmo arrefecer antes da realização de outro teste (ASTM D4944-04, 2004; Chowdhury, 2014; Haque, 2001).

Cálculo

Os resultados obtidos pelo equipamento correspondem ao teor em água da massa húmida. No entanto, o *w* obtido em estufa corresponde ao teor em água da massa seca. Assim, para o correto tratamento dos dados, deve aplicar-se a seguinte fórmula aos resultados obtidos através do *speedy* (Chowdhury, 2014).

$$w_{dry} = \frac{w_{wet}}{100 - w_{wet}} \times 100 \qquad \text{Equação 2}$$

onde w_{dry} corresponde ao teor em água da massa seca e w_{wet} ao teor em água da massa húmida (valor lido no manómetro).

Dificuldades na leitura

Dependendo de alguns materiais considerados mais "difíceis", ou até mesmo a procedimentos não tão corretos por parte do operador, poderão surgir algumas dificuldades na leitura dos resultados obtidos.

No caso de uma leitura negativa, isto é, se a agulha do manómetro não efetuar qualquer movimento, deve-se verificar se o reagente foi colocado no corpo do dispositivo, que existe humidade no material a ensaiar e, se sim, proceder à realização de um novo ensaio com três vezes o peso normal do material.

Pode surgir uma leitura mais baixa que a esperada ou considerada normal para a amostra em questão. Neste caso, deve-se considerar as seguintes hipóteses:

- agitação excessiva dos materiais com a mistura contida nas estruturas celulares;
- o material a ensaiar não foi pesado corretamente tendo resultado num peso inferior ao peso correto;
- o equipamento pode estar muito frio (a realização de alguns ensaios irá aquecer o mesmo);
- o reagente e o material a ensaiar entraram em contacto antes de fechar o dispositivo, permitindo assim a saída do gás o que impede o movimento do ponteiro do manómetro e a sua leitura correta;
- o anel de borracha pode estar danificado ou a cápsula não foi bem apertada;
- o material não foi corretamente preparado ou o reagente não foi convenientemente misturado com o material. Neste caso, deitar a mistura numa folha de papel e examinar e se necessário usar as bolas de aço para misturar melhor o material com o reagente;

- o reagente pode estar semi-ativo devido a longos períodos de armazenamento ou por ter estado exposto ao ar;
- não ter sido feita a limpeza da cápsula ou do corpo do *Speedy* depois da realização de cada ensaio; e
- faltar multiplicar a leitura feita no manómetro no caso de se aplicar o método proporcional já mencionado.

No caso de o ensaio resultar numa leitura mais elevada que a espectável, deve-se considerar as seguintes possibilidades:

- o material não foi pesado corretamente;
- a leitura do manómetro estar a ser realizada sem que o aparelho esteja na posição vertical;
- realização de testes consecutivos sem que se permita que o equipamento arrefeça devidamente;
- a agulha pode não estar a voltar à posição zero após a libertação do gás. Se for esse o caso, deve-se recalibrar o aparelho;
- não se efetuar a divisão da leitura no manómetro quando se utiliza o método proporcional já mencionado; e
- o *Speedy* pode não ter sido agitado o suficiente de forma a arrefecer os gases antes de serem lidos os resultados.

A obtenção da leitura pode ainda ser um pouco lenta. Esta situação acontece quando os materiais provocam uma reação química lenta tendo como consequência a subida lenta da agulha do manómetro. Nos casos em que isto aconteça, deve-se recorrer a bolas de aço.

Calibração

A calibração do equipamento é algo fundamental para obter e ler resultados fidedignos e no caso em questão, quer o *Speedy,* quer a balança são calibrados como uma unidade durante o procedimento.

As curvas de calibração são obtidas através da seleção de diversas amostras representativas de uma gama de materiais do solo a ser testado e tendo um intervalo de teores de água relativamente amplo. Para este procedimento, é necessário esquartelar cada amostra cuidadosamente de modo a não perder nenhuma humidade, sendo uma destas porções ensaiadas de acordo com o método do *speedy* sem recurso a uma curva de calibração, e a outra ensaiada de acordo com o método de estufa de acordo com a norma ASTM D2216. Depois aplicadas com ambas as técnicas, é elaborado um gráfico com os valores obtidos pela secagem em estufa versus os obtidos pelo método do

speedy. A partir deste gráfico, desenhar-se-á a curva que melhor se ajusta aos dados através dos teores de humidade obtidos para formar uma curva de calibração para cada tipo de solo.

É de mencionar que uma grande dispersão nos dados indica que um dos métodos não é aplicável ao solo ensaiada. Na Figura 8 é possível analisar uma curva de calibração típica (ASTM D4944-04, 2004).

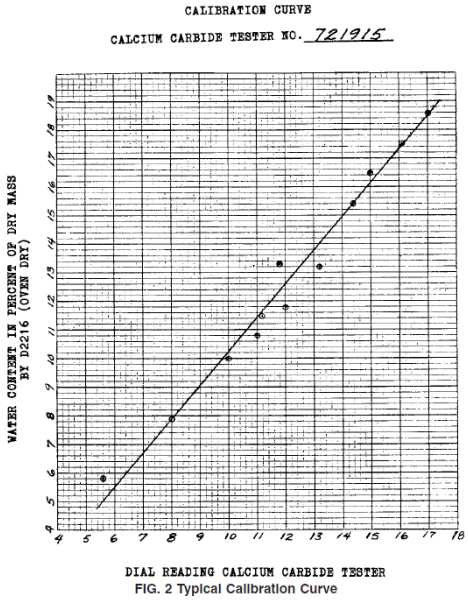


Figura 8: Curva de calibração típica do equipamento *speedy* (ASTM D4944-04, 2004).

Relatório de ensaio

No relatório de ensaio devem estar incluídos os seguintes aspetos:

- Número de ensaio atribuído;
- Identificação da amostra por localização e por classificação ou descrição do material;
- Identificação por número do equipamento;
- Massa da amostra e leitura feita no mostrador do manómetro; e
- Teor em água da amostra (ASTM D4944-04, 2004).

Precisão e enviesamento

À semelhança do que se verificou noutros métodos de obtenção do teor em água, a norma não indica valores relativos à precisão do ensaio, pelos motivos já mencionados, mas foram sendo desenvolvidos diversos estudos com o intuito de verificar o desempenho desta técnica.

Oliveira Lucas (2019), que realizou 26 ensaios para cada método em amostras saturadas de solos arenosos, solos argilo-arenosos e solos argilosos contendo até 30 % de fração argilosa ("solos franco

argilosos", na literatura brasileira) e solos argilosos com maiores percentagens de argila. A realização do ensaio com auxílio do *speedy* e a sua comparação com a secagem em estufa a 65 ºC por um período de 48 h, permitiu concluir que, em todos os tipos de solo foram obtidos resultados mais baixos com o método do carbureto de cálcio do que aqueles obtidos pela secagem do material em estufa. Para além disso, apesar dos ensaios em solos com elevadas percentagens de argila não terem sido tão bons quanto aqueles realizados em areias, estes podem ser considerados satisfatório na medida em que apresentaram um coeficiente de correlação de 0,80, tendo os solos argilo-arenosos apresentado os resultados menos positivos e os solos "franco argilosos" os melhores resultados. A acrescentar, ficou também claro que quanto maior for o conteúdo de água presente no solo, menor a precisão, uma vez que solos caracterizados como argilosos e argiloarenosos, que são materiais com um teor em água naturalmente mais elevado, mostraram ser os que mais se afastaram da reta de correlação. Por fim, os autores afirmam que, de um modo geral, as variações granulométricas não influenciam os resultados relativos à humidade das amostras e que estes apresentam uma certa linearidade apesar de, individualmente, a argila arenosa não ter tido resultados satisfatórios (Oliveira Lucas, 2019).

Ribeiro et al. (2018) através de um estudo em amostras de argila areno-siltosa, areia argilosa e areia argilo-siltosa, teores em água induzidos de 10, 20 e 30 % (devido à maior abundância de teores em água dentro deste intervalo de valores, em ambientes naturais) obteve resultados muito semelhantes aos referidos por Lucas et al. (2019). Acrescentando apenas que a equação de correção ajustada permite reduzir a dispersão dos valores e acredita que o equipamento poderá ser confiável desde que devidamente calibrado (Ribeiro et al., 2018).

Passos Braga et al. (2017) afirmar também ter evidenciado diferenças significativas entre os métodos e, em concordância com os estudos já referidos, também não obteve resultados satisfatórios para teores em água de 10 e 20 % possivelmente devido à falta de correta calibração do equipamento (Passos Braga et al., 2017).

O estudo desenvolvido por Berney et al. (2011) demonstra conclusões um pouco diferentes das até então descritas. O autor afirma que, de entre os métodos que testou, o que recorre ao *speedy* mostrou ser o mais preciso, mas também o menos exato, tendo sobrestimado os valores do *w* em todos os tipos de solos em estudo (classificadas como CH, MC SP, SP-SC, SM, GP-GH segundo a classificação unificada). Tal é justificado devido ao tamanho reduzido das amostras de solos de material grosseiro, uma vez que nestes apenas é possível ensaiar o material de grão fino (que passe no peneiro nº 4), que corresponde à fração que melhor retém a humidade disponível. E, no caso dos solos onde predomina a fração mais fina, o cálculo de multiplicação dos valores de conversão associado à determinação de teores em água mais elevados, característicos deste tipo de materiais,

que acaba por criar um erro geral na estimativa do valor final. Os autores defendem que esta técnica apenas deve ser aplicada em último recurso se não estiver ao dispor nenhuma outra (Berney IV et al., 2011). Santos (2008) recomenda limitar a aplicação este método a solos granulares, na medida em que solos mais finos, isto é, argilosos, têm precisões menores em virtude da dificuldade da desagregação total das partículas no interior do instrumento (Santos, 2008).

2.3.5. Método do micro-ondas

A determinação do teor em água em solos pode ainda ser feita com recurso a micro-ondas, isto é, através de ondas eletromagnéticas com comprimento de onde compreendido entre 1 mm e 1 m. Este método direto não só é muito simples, como também é muito semelhante ao ensaio padrão da secagem em estufa (assim como do aquecimento direto) podendo até mesmo ser aplicado em substituição ao mesmo quando são desejados resultados mais rápidos e não há a necessidade de estes serem tão precisos.

Neste ensaio, o calor é induzido na amostra devido à interação entre as suas moléculas e uma frequência alternada no campo elétrico. De um modo simplificado, e à semelhante de outros ensaios, o método consiste em pesar a amostra com a humidade natural, secá-la num micro-ondas e voltar a pesar a amostra depois de seca. Sendo o *w* obtido através da divisão da massa de água pela massa seca do solo, multiplicada por 100.

Ensaio descrito na norma ASTM D 4643-00 (Brito, 2006; ASTM D4643-00,2000).

<u>Considerações gerais e limitações</u>

De acordo com a norma da ASTM, este método apresenta limitações muito semelhantes às mencionadas no método de secagem de solo por aquecimento direto, nomeadamente relativas aos materiais que não são recomendados a serem sujeito a este procedimento (ASTM D4643-00, 2000). Para além dos já referidos nesse método, também se podem incluir: elementos com elevadas quantidades de carbono e solos metálicos. Solos que contenham resíduos com elevado teor em carbono, como por exemplo, cinzas de fundo, cinzas voláteis, xistos provenientes de minas de carvão e resíduos de carvão fino, podem promover a formação de fumo ou até mesmo de chama durante o aquecimento em forno de micro-ondas (exceto resíduos com baixo teor em carbono, isto é, inferior a 1 ou 2 %). A complicação referente aos solos com elevado teor de metal, como bauxite e outros solos com minério de ferro, reside na possibilidade de sobreaquecimento devido à elevada afinidade destes materiais para com a energia de micro-ondas (Usmen & Kheng, 1986). A questão

do sobreaquecimento é possivelmente a principal objeção a este método uma vez que terá como consequência um *w* mais alto do que aquele espectável pelo método padronizado, afetando diretamente a fidelidade dos resultados obtidos. No entanto, esta questão pode ser minimizada quando se opta pela utilização de um micro-ondas que permita configurar para temperaturas que não sejam a potência máxima do equipamento (Brito, 2006; ASTM D4643-00, 2000).

Como indicado noutros métodos de obtenção do *w* em solos, a matéria orgânica pode também representar um desafio ao atingimento de resultados satisfatórios. Trabalhos anteriores de Gilbert (1974) indicam que materiais como a turfa, podem apresentar as mesmas questões descritas anteriormente para resíduos com elevado teor em carbono, acabando por não ser recomendada a secagem deste tipo de amostras em fornos micro-ondas. No entanto, Riley (1969) relatam a execução do ensaio com sucesso (citado em Kramarenko et al., 2016).

É ainda possível que esta técnica altere as propriedades do material ensaiado. Alguns estudos, nomeadamente de Lade e Nejadi-Babdai (1976), afirmam que os limites de *Atterberg* são afetados pelo aquecimento realizado através de micro-ondas, tornando-os mais baixos. Sendo que as maiores reduções ocorrem em argilas altamente plásticas, e as menores reduções em argilas com baixa plasticidade. A acrescentar, tem-se o facto de os limites de retração tenderem a aumentar, o que se reflete no potencial de expansão que tende a ser mais reduzido (Usmen & Kheng, 1986). O facto deste método potencializar temperaturas elevadas de forma localizada, também contribui para a alteração das características físicas do material, entre as quais: desagregação de partículas individuais, vaporização e transição química. Por este motivo, não se recomenda a utilização de amostras secas por aplicação deste método para a realização de outros ensaios.

Um outro aspeto relevante está relacionado com a granulometria do material amostrado uma vez que este método é mais adequado para material que passa no peneiro nº 4 (4,75 mm), o que não significa que materiais constituídos por grãos de maiores dimensões não possam ser testados. No entanto, é necessário ter um cuidado especial pois existe uma maior probabilidade de as partículas quebrarem (Brito, 2006; ASTM D4643-00,2000).

Não se recomenda a secagem de múltiplas amostras, sobretudo se as amostras forem constituídas por diferentes materiais e/ou com diferentes quantidades de água. Uma vez que tal resultaria no sobreaquecimento de alguma(s) da(s) amostra(s) por conterem quantidades menores de água, ou num processo pouco prático visto que seria necessário controlar tempos de exposição diferentes.

Por fim há que ter em consideração as indicações relativas aos recipientes que devem ou não ser usados para a realização deste ensaio, que se encontram indicadas no seguinte (Usmen & Kheng, 1986).

Equipamento

i. Forno micro-ondas, de preferência ventilado.

   O tamanho e potência do forno dependerá do uso pretendido. A possibilidade de controlar a potência do equipamento é importante visto que reduz o potencial de sobreaquecimento da amostra;

ii. Balanças (com capacidade mínima de 2000 g e com legibilidade de 0,1 g);

iii. Recipientes de amostras.

   Feitos com material não metálico e não absorvente, resistente a choque térmico e não sujeito a alterações de massa ou forma quando submetido a aquecimento, resfriamento ou limpeza repetidos. São exemplos de bons materiais:

   - Pratos de evaporação de porcelana;
   - Prato de vidro borossilicato;
   - Copos ou pratos de papel (podendo exigir pré-secagem antes de utilização);

iv. Equipamentos para o manejo de recipientes (luvas de proteção de calor ou suportes adequados para retirar os recipientes quentes do forno);

v. Exsicador, que contenha sílica gel, fosfato de cálcio anidro ou equivalente;

vi. Dissipador de calor.

   Material ou liquido colocado no micro-ondas para absorver energia depois de ocorrer a perda da humidade. A sua utilização reduz a possibilidade de ocorrer sobreaquecimento da amostra e danos no forno, e

vii. Ferramentas de agitação, nomeadamente espátulas e varetas de vidro (hastes de vidros de dimensões reduzidas podem ser úteis para agitação e têm a vantagem de que podem ser deixadas no recipiente da amostra durante o ensaio, diminuindo a possibilidade de perda de material) (ASTM D4643-00, 2000).

Preparação e acondicionamento de amostras

A preparação das amostras irá depender do propósito e aplicação dos resultados, do tipo de material a ser ensaiado e no tipo de amostra. Posto isto, segundo a norma ASTM D4643-00: para amostras a granel a seleção da amostra é realizada após o material ter sido bem misturado e quantidade de material deverá ser de acordo com a Quadro 3; para amostras de dimensões mais reduzidas, deve ter-se em especial atenção para o facto de esta ter de ser representativa, sendo que, quando se trata de solos não coesivos o processo de preparação da amostra corresponde ao anteriormente referido, isto é, mistura-se bem o material e retira-se uma amostra com

determinada massa como descrimina a Quadro 3; e quando a amostra é de um solo coesivo, deve remover-se cerca de 3 mm de material da periferia exposta da amostra e dividir a restante porção a meio de modo a verificar se o material se encontra estratificado. Se isso se verificar, seleciona-se uma porção média ou porções individuais, ou até mesmo ambas, e toma-se nota das porções ensaiadas e dos seus resultados. Ainda no que toca aos solos coesivos, se nestes forem observadas partículas de dimensões mais grosseiras, deve-se seguir a indicações do Quadro 3. Uma técnica que pode acelerar a secagem e evitar a formação de crosta ou sobreaquecimento destes materiais é o corte destas amostras coesivas em partículas de cerca de 6 mm (ASTM D4643-00,2000).

Quadro 3: Massas recomendadas de amostras a usar no método do micro-ondas (ASTM D4643-00, 2000).

Material retido no peneiro inferior a cerca de 10% da amostra (mm)	Massa recomendada da amostra húmida (g)
2,0 (nº 10)	100 a 200
4,75 (nº4)	300 a 500
19 (3/4 in.)	500 a 1000

É possível ensaiar amostras com massas menores que as estipuladas no Quadro 3, se tal for adequado para o estudo, devendo essa opção estar indicada no relatório de resultados.

Sendo este um método para a obtenção do teor em água que pode substituir o método padrão de secagem em estufa, muitas vezes é útil ou até mesmo necessário comparar os resultados obtidos por ambas as metodologias de ensaio. Nesse caso, deve preparar-se uma segunda amostra para a realização de um ensaio a partir do método com o qual se deseja comparar, tomando as precauções necessárias para que as amostras apresentem a mesma humidade, nomeadamente, o processamento rápido do ensaio para evitar possíveis perdas de humidade (ASTM D4643-00, 2000).

Medidas de segurança

Como tem sido realçado, a segurança do operador é sempre importante em qualquer ensaio e na utilização de qualquer equipamento. Tendo em conta de que este é um método que envolve elevadas temperaturas, o operador deve ainda ter em atenção os diversos aspetos já referidos para esta questão e, para além dessas precauções devem também ser tomadas em consideração as fornecidas pelo fornecedor/fabricante do equipamento, assim como a verificação do bom fecho das portas e da limpeza e condições das mesmas (ASTM D4643-00, 2000).

Procedimento

O seguinte conjunto de operações permite executar corretamente o ensaio:

1. Determinar e registar a massa de um recipiente limpo e seco.
2. Colocar a amostra no recipiente e, de forma imediata, determinar e registar a massa.
3. Colocar o recipiente com a amostra no forno micro-ondas juntamente com o dissipador de calor e ligar o forno por 3 minutos.
4. Terminados os 3 minutos, remover o recipiente com a amostra do forno e, de seguida, pesá-la, ou deixar arrefecer no exsicador (de modo a permitir o manuseio e a prevenir danos na balança).
5. Misturar cuidadosamente a mistura, prevenindo qualquer perda de material.
6. Colocar novamente o recipiente com a amostra no forno e reaquecê-la por 1 minuto.
7. Repetir os passos 4 a 6 até que a diferença obtida entre as determinações de massa de amostras sucessivas seja insignificante para o cálculo do *w* (valores na ordem de 0,1 % são aceitáveis).

Quando estão a ser ensaiadas amostras de solos semelhantes, é possível a padronização dos tempos de secagem através de ciclos. Deve-se, no entanto, verificar periodicamente estes ciclos com o objetivo de assegurar que os resultados da determinação da massa seca final são equivalentes aos obtidos pelo procedimento indicado no ponto 7 (ASTM D4643-00, 2000).

Cálculo

O valor final do teor em água é obtido por aplicação da Equação 1.

Relatório de ensaio

No relatório de ensaio devem estar incluídos os aspetos referidos no método padrão devendo ser acrescentada:

- Identificação do forno micro-ondas, das configurações de secagem e dos ciclos de secagem utilizados quando estes são aplicados;
- Tempo e definição do período de tempo inicial de secagem e posteriores períodos incrementais de secagem; e
- Identificação de ensaios de comparação, quando estes são realizados, assim como o método comparativo escolhido (ASTM D4643-00, 2000).

Precisão e enviesamento

De acordo com a norma ASTM D4643-00, apesar de a precisão estar relacionada com o tipo de solo, humidade inicial e tamanho da amostra, e ser influenciada pelo operador, esta ronda os 0,96 %. Relativamente ao enviesamento, a norma não estipula um valor de referência aceite, no entanto, segundo a mesma, estudos indicam uma diferença média entre os dois métodos em questão é de cerca de 0,24 % na determinação do teor em água em solos micáceos (com 5 a 25 % de micas) e de 0,61 % para outros solos. O desvio padrão da diferença entre o *w* obtido por secagem em micro-ondas e em estufa para solos micáceos e para outros tipos de solos é 0,2 % e 0,3 %, respetivamente (ASTM D4643-00, 2000).

O facto de esta ser uma técnica que possibilita a obtenção rápida do *w*, torna-a a principal candidata a substituir o método padrão e, por este mesmo motivo, ao longo de décadas tem sido alvo de estudo a sua comparação e a análise dos principais pontos que influenciam seu desempenho.

Foram referidos por Gilbert (1974) diversos os aspetos que podem ter influência na precisão dos resultados obtidos por secagem com recurso a micro-ondas, entre os quais, o tipo de solo. Segundo o autor, materiais como haloisite, micas, montemorilonite, gesso, materiais com elevados teores em carbono, em matéria orgânica e ainda solos metálicos não seriam recomendados para a aplicação deste método. Esta indicação não foi só deixada por este autor, como também por Chung e Ho (2008) e Cormick (2015) que, apesar de acreditar que a secagem por micro-ondas é viável em quase todos os tipos de solos, deixou como exceção solos com mais de 10 % de matérias orgânica na sua constituição, assim como materiais com bentonite que apresentem um teor em água superior a 110 % (Jastrzębska, 2019).

A possibilidade de ocorrem pequenas explosões ou ignições também foi analisada, nomeadamente por Jastrzębska (2019) uma vez que este as experienciou durante o desenvolvimento da sua investigação, tendo-se deparado com a explosão de uma amostra e a queima parcial de outra. O primeiro caso, o autor justifica com o excesso de pressão causada pela rápida evaporação da água no interior do solo que incapacita a fuga do vapor, e o segundo devido à presença de ferro na amostra. Para este último caso, é apresentada uma recomendação para a resolução deste problema que consiste em escolher a frequência de onda certa (nem muito baixa nem muito alta) e uma potência não muito elevada (Jastrzębska, 2019).

No entanto, alguns autores contrariam estas indicações, nomeadamente Riley (1969) que diz ter obtido resultados positivos após secagem em micro-ondas de materiais com elevado teor em matéria orgânica (Usmen & Kheng, 1986). Assim como Kramarenko et al. (2016) mostrou obter resultados muito próximos entre ambos os métodos para as argilas orgânicas (Kramarenko et al.,

2016). No que diz respeito a argilas também existe bibliografia onde a avaliação deste método de secagem rápida é positiva, nomeadamente a dos autores Jalilian, Moghaddam e Tagizadeh (2017) que através da secagem por 10 minutos com o auxílio de um forno micro-ondas com potência de 600 watts conseguiu obter resultados muito semelhantes aos obtidos pelo método de secagem convencional (Jalilian et al., 2017). E pode fazer-se referência ao artigo de Daoud (2012) que não só demonstrou grande proximidade entre os resultados obtidos pelos dois métodos para a obtenção do teor em água de solos, como também nos limites de consistência (Daoud, 2012).

Para além do tipo de solos, a massa da amostra a ensaiar tem influência no ensaio, mais propriamente na duração deste. Daoud (2012) comprovou a consequência lógica de que amostras maiores necessitam de mais tempo para secarem por completo, e por consequência um gasto energético maior, e ainda que amostras menores não secam de forma tão eficiente e que os resultados obtidos a partir de amostras com esta característica apresentam resultados menos precisos, sobretudo em solos com elevada plasticidade (Daoud, 2012). Jastrzębska (2019) apresentou conclusões muito semelhantes às agora mencionadas, tendo também feito referência à possibilidade de secar mais do que uma amostra em simultâneo demonstrando que esse não é um processo viável na medida em que também eleva o tempo de secagem, sobretudo das argilas. Este autor, abordou ainda a questão relativa às possíveis explosões ou ignições de materiais dado que durante o desenvolvimento do estudo ocorreu explosão de uma amostra e a queima parcial outra. O primeiro caso, o autor justifica com o excesso de pressão causada pela rápida evaporação da água no interior do solo que incapacita a fuga do vapor, e o segundo devido à presença de ferro na amostra. Para este último caso, é apresentada uma recomendação para a resolução deste problema que consiste em escolher a frequência de onda certa, isto é, nem muito baixa nem muito alta, e uma potência não muito elevada (Jastrzębska, 2019).

O tempo de secagem é um fator essencial neste método uma vez que a sua principal vantagem reside na rapidez com que o material fica completamente seco, traduzindo-se também no consumo energético. Jastrzębska (2019) concluiu que solos coesivos recorrem a tempos de secagem menores que ao não coesivos, atribuindo como causa o facto de, neste tipo de materiais, a água estar mais associada a cristais de argila e, que por isso, o aquecimento do interior e as vibrações resultantes das partículas causam a libertação da água sendo, por conseguinte, a secagem mais rápida. Um outro fator que afeta o tempo de secagem, reside na humidade presente na amostra, isto é, quanto maior for a massa de água presente, mais tempo será necessário até atingir um peso constante. Mesmo assim, provetes com elevado *w* secam de forma muitíssimo mais rápida com a aplicação deste método, podendo ser 19, 30 ou até 50 vezes mais rápido no caso de areias, cascalho e argilas, respetivamente. Assim, o autor conclui que a quantidade de água presente, a massa e a quantidade

de amostras que se secam em simultâneo no mesmo equipamento, afetam a duração final do ensaio. Fatores estes que no método de secagem convencional não apresentam tanta interferência (Jastrzębska, 2019).

Por fim, a questão apresentada anteriormente, que dava indícios de que a secagem através de micro-ondas gera resultados mais elevado, mostrou-se ser real nos estudos feitos por Jastrzębska (2019), Carter e Bentley (1986) e ainda por Hargerty et al (1990), entre outros. Tal acontecimento deve-se à parcial absorção do vapor, que pode sugerir que os micro-ondas secam "mais" que a estufa convencional (Jastrzębska, 2019).

Posto isto, é possível afirmar que o método é aprovado por quase todos os autores de forma unânime, o que confirma a sua eficácia e compatibilidade com os resultados obtidos pelo método padrão, não descorando que, apesar de ser alvo de pesquisa há cerca de 60 anos, a secagem com recurso a micro-ondas ainda requer muito trabalho experimental.

2.3.6. Método do banho de areia

O princípio de determinação do teor em água pelo método do banho de areia é bastante semelhante ao método de secagem em estufa, diferindo na fonte de aquecimento usada e no facto de recorrer a um banho de areia que consiste numa bandeja resistente ao calor que contém areia limpa com profundidade de cerca de 25 mm (Soil Management, 2018).

A execução deste ensaio inicia-se, à semelhança de outros métodos já mencionados, com a determinação da massa do recipiente onde se irá colocar a amostra (m_1). Depois de se desintegrar a amostra de solo húmido é colocada no recipiente e regista-se o peso de ambos (m_2). Posto isto, o banho de areia é colocado sobre uma fonte de aquecimento (podendo esta ser um fogão de pressão de parafina, elétrico ou até mesmo um queimador de gás) e a amostra de solo sobre a areia. Como referido em processos semelhantes, é necessário ter em consideração o sobreaquecimento do solo amostrada e, por esse motivo, é fundamental mexer a amostra cuidadosamente, podendo ainda serem colocados alguns pedaços de papel como indicadores de sobreaquecimento. Para verificar se a amostra se encontra completamente seca, deve-se removê-la da fonte de calor e pesá-la, e, de seguida, aquecê-la novamente por 15 minutos e registar nova pesagem. Poder-se-á dizer que o solo se encontra seco se se registar uma variação de 0,1 g em solos de grão fino, 0,5 g para solo de grão médio e 5 g para solo de grão grosseiro. Por fim, deixa-se arrefecer a amostra e determina-se o peso seco (m_3), sendo o valor de teor em água final obtido pela média de três repetições.

Deve-se ainda reforçar que visto que esta é uma técnica que recorre a elevadas temperaturas e com difícil controlo da mesma, o que poderá afetar a estrutura cristalina do solo, não é recomendada a aplicação deste ensaio em solos com materiais orgânicos, teores em cálcio ou com alto teor em gesso.

Cálculo

O cálculo do teor em água é resultado da aplicação da Equação 1 (Soil Management, 2018; The Constructor, 2019).

2.3.7. Método da balança de torção por infravermelhos

Este é um método direto de obtenção do *w* que, como o próprio nome indica, recorre a uma lâmpada de infravermelhos de 250 W, que dispõe da possibilidade de controlar e regular a tensão entrada para ajustar o calor e temperatura de secagem, e uma balança de torção calibrada para fornecer teores em água na faixa de 1 a 100 % (com uma contagem mínima de 0,2 %) onde também é colocado um termómetro, mais especificamente no recipiente onde é introduzida a amostra (denominada de panela de amostragem), com uma intervalo de 40 a 150 °C.

O equipamento está calibrado para obter diretamente o *w* em amostras de solo com cerca de 25 g e com partículas de tamanho inferior a 2 µ e permite obter resultados relativamente à massa húmida inicial dentro de 15 a 30 minutos dependendo do tipo de solo e da humidade presente (The Constructor, 2019).

As operações que advém da execução desta técnica são muito simples visto que a pesagem e a secagem do material ocorrem em simultâneo, sendo apenas necessário colocar a amostra na panela de amostragem da lâmpada de infravermelhos e distribuí-la uniformemente, ligar a lâmpada de infravermelho e manter a temperatura abaixo dos 110 °C. O teor em água da massa húmida é obtido diretamente quando o ponteiro da balança estiver estabilizado, que indica que o material já se encontra seco.

O ensaio em questão revela-se muito útil quando a determinação é feita em solos que reabsorvem rapidamente a humidade do ambiente após a secagem (Civil Wale, 2020) e, à semelhança do método do *speedy* já estudado, o teor em água da massa seca será obtido pela Equação 2.

2.3.8. *Método radioativo ou nuclear*

O método radioativo é um método indireto para a obtenção do teor em água que recorre a instrumentação nuclear para não só determinar esta propriedade como também a baridade de solos e agregados de granulometria extensa. O instrumento nuclear é denominado de gamadensímetro e dispõe de uma pequena fonte de radiação que emite raios gama que são detetados por medidores que quantificam essa radiação e calculam a densidade através da capacidade desses raios serem dispersos ou absorvidos em proporções aproximadas à densidade do material através do qual são passados. O equipamento dispõe ainda de uma pequena fonte radioativa interna que emite neutrões para determinar o *w* com base no princípio da termalização que corresponde à desaceleração de neutrões rápidos pela colisão de átomos leves, como o hidrogénio. Os neutrões emitidos reagem com o hidrogénio presente na molécula de água e a deteção desses neutrões refletidos pelo processo de termalização dão a indicação da quantidade de hidrogénio presente na amostra, e, por consequência, da quantidade de água. Isto é, o dispositivo analisa a reflexão de neutrões e retorna em teor em água. A determinação destas características pode ser executada de dois modos distintos: pelo método de ensaio à superfície e ainda por transmissão direta em profundidade que permite fazer medições até 300 mm de profundidade (Berney IV et al., 2011; Rasti et al., 2020; Neto & António de Almeida, 2013; VDOT, 2016).

Apesar de permitir a determinação do teor em água, e por esse motivo estar presente nesta dissertação, a utilização deste método não se resume apenas a esse propósito, sendo um ensaio fundamental no controlo da compactação de aterros, sub-leitos, sub-bases, bases e barragens. É ainda uma ferramenta base na investigação preliminar para determinar o grau de densidade de solos naturais e novas rodovias, assim como na determinação do *w* e da densidade de pavimentos de fundação após uso do mesmo por um período de tempo com o intuito de perceber o efeito do tráfego e das mudanças climáticas. E permite também fazer uma avaliação das variações sazonais da humidade de densidade do terreno (Burgers & Yoder, 1962).

Para além do vasto campo de aplicações e de ser um equipamento portável, são enumeras as vantagens associadas ao método e ao equipamento nuclear, uma vez que é um método não destrutivo, de rápida execução e ainda permite obter resultados sem o incomodo da amostragem direta visto que a sua realização do ensaio é feita em campo. Uma outra vantagem, reside no facto de possibilitar o controlo em grandes áreas com tempo e custos mínimos e com máxima eficácia de operação (Burgers & Yoder, 1962), para além de que é insensível à salinidade e temperatura (Campbell, 2014). Por outro lado, existem algumas considerações a ter antes de se optar por este método, a começar pelo facto de ser um método radioativo, o que associa uma série de questões

de segurança e burocráticas relacionadas com a propriedade do equipamento, a operação e transporte do mesmo (Berney IV et al., 2011) e é um equipamento caro e pesado. Associado ainda ao facto de ser uma técnica que recorre a radiações nocivas, não permite também o registo continuo de medições (Campbell, 2014). À semelhança de outros métodos, a fiabilidade dos resultados pode ser afetada por certos elementos, nomeadamente aço potássio, cádmio, boro e cloro, devendo-se também mencionar que o equipamento deteta a presença de todos os átomos de hidrogénio. Isto é, quer os presentes na água absorvida, como também no interior da matéria orgânica. Finalmente, é importante avaliar a homogeneização do material a ensaiar, pois se tal não se verificar podem ocorrer desvios nos resultados (o que torna não recomendáveis misturas de solo-enrocamento), e o facto de surgirem interferências provenientes de outros equipamentos semelhantes (Brito, 2006).

2.3.9. Método do picnómetro

O picnómetro corresponde a um frasco de vidro com cerca de 1 litro de capacidade acompanhado de uma tampa cónica de metal que possui um pequeno orifício de 6 mm de diâmetro no seu ápice e que permite fechar o instrumento com um mecanismo de parafuso. Este ensaio de campo permite obter resultados rápidos (em cerca de 10 a 20 minutos) recorrendo apenas a um picnómetro, uma balança, água e uma amostra de solo com massa compreendida entre 200 e 400 g e efetuando apenas quatro pesagens. Para a obtenção do teor em água a partir deste método, deve começar-se por determinar o peso do dispositivo, com tampa, limpo e seco (w_1) e de seguida o peso desse conjunto juntamente com cerca de 200 a 400 g de solo húmido (w_2). Depois de determinadas estas massas, vai-se incrementar pequenas quantidades de água tendo em atenção de que o conjunto de materiais deve ser misturado cuidadosamente de modo a remover o ar aprisionado, podendo, no entanto, este processo ser realizado com auxílio de uma bomba de vácuo. Assim que o picnómetro se encontrar cheio até ao orifício da tampa, e de esta se encontrar limpa, determina-se o peso do instrumento juntamente com o solo e a água (w_3). Remove-se todo o material do equipamento e, depois de lavado, obtém-se a massa deste preenchido unicamente com água (w_4). O teor em água será por fim obtido por aplicação da Equação 3, onde G corresponde à densidade relativa (Kailasha Foundation, 2018; Soil Management, 2018; Civil Wale, 2020).

$$w = \left[\left(\frac{w_2 - w_1}{w_3 - w_4}\right)\left(\frac{G-1}{G}\right) - 1\right] \qquad \text{Equação 3}$$

O ensaio descrito apresenta o benefício de ser uma rápida execução, o que permite obter os resultados num curto período de tempo, e de não necessitar que seja feita a secagem do solo para a obtenção de resultados. No entanto, só pode ser aplicado quando a densidade relativa é conhecida, o que por si só acarreta uma outra limitação que reside no facto de a precisão do ensaio estar também dependente da precisão utilizada no cálculo desta unidade. Para além disso, o ar aprisionado pode ser uma fonte de erros significativos, daí recomendar-se apenas a aplicação deste método a solos de granulometria mais grosseira, visto ser mais difícil contornar essa questão em solos de granulometria fina (Soil Management, 2018).

2.3.10. Método com recurso a sensores

Por fim, apresentam-se alguns métodos indiretos de obtenção do teor em água que recorrem à tecnologia de sensores, nomeadamente o Dual needle heat pulse (DNHP) – "pulso térmico de agulha térmica", resistência elétrica e dielétricos onde são incluídos o método da capacitância, de reflectometria de domínio temporal (TDR) e de domínio de frequência (FDR).

Antes da apresentação de cada técnica, é imprescindível ter em conta que, como em todos os métodos e técnicas estudadas até então, existem fatores que interferem na precisão dos resultados obtidos, mais especificamente: o tipo de solo, percentagem de argila, salinidade, o contacto entre o solo e o sensor e a densidade aparente. Apesar de ser impossível minimizar estas condicionantes, é possível minimizá-las com a correta escolha do sensor (Meter Group, 2020).

O método DNHP tem por base teórica o facto de que alterações na capacidade térmica do solo dependem fortemente do teor em água do mesmo, permitindo uma calibração que relacionada o teor em água volumétrico com a capacidade térmica (Campbell, 2014). A técnica recorre a um sensor com dois pinos paralelos: um que provoca o aquecimento e outro que regista a temperatura. O processo inicia-se com a introdução de um pulso de calor de curta duração produzido pelo pino de aquecimento e a resposta térmica do solo é registada pelo pino da temperatura. O aumento máximo de temperatura (delta T) irá permitir calcular a capacidade térmica e convertê-la em TAV (Campbell, 2014; Kamai et al., 2015). Esta técnica possibilita a medição de um volume de material reduzido, sendo o método disponível mais específico no que toca à localização. No entanto, requer instrumentos de recolha de dados com medição e análise precisa da temperatura, pode ser suscetível a gradientes de temperatura no solo. A acrescentar, o equipamento apresenta alguma fragilidade, sendo por vezes difícil manter a distância entre os pinos constante, e o facto de apenas permitir fazer medições num volume de solo pequeno pode também representar uma desvantagem quando são necessários resultados em volumes maiores (Campbell, 2014).

Os sensores de resistência elétrica permitem obter dados relativos ao teor em água (volumétrico) através da produção de uma corrente elétrica gerada pelo contacto ou introdução de um par de elétrodos no solo que fornecerá um valor de resistência ou condutividade elétrica (Meter Group, 2020; Kamai et al., 2015). Sabe-se que a água é um mau condutor e que são os iões que transportam a corrente de um elétrodo para o outro, e, apesar de em teoria, fazer sentido que a resistência diminua com o aumento da quantidade de água no solo, este fundamento apoia-se na hipótese critica de que o número de iões no solo se permanece constante. Se tal não se verificar, ou por aplicação num solo diferente, será difícil obter a precisão necessária, uma vez que, mesmo sendo a mesma quantidade de água, não sendo o número de iões presentes o mesmo a capacidade de a corrente fluir será alterada. Apesar de serem equipamentos relativamente baratos, de simples execução e de permitirem medições continuas, pelas razões mencionadas anteriormente, há quem defenda que a sua utilização não é apropriada para a elaboração de estudos científicos (Meter Group, 2020)

Finalmente os sensores dielétricos têm como fundamento a medição da capacidade de armazenamento da carga do solo. Estes, de um modo geral, minimizam a influência da densidade aparente na precisão dos resultados obtidos, contudo, fatores como temperatura e condutividade elétrica podem proporcionar alguns desafios. Na medida em que mudanças na temperatura podem alterar a disponibilidade de água a ser polarizada no campo elétromagnético, assim como moléculas polares também podem armazenar carga num mesmo campo, dependendo da frequência deste (Campbell, 2014).

O sensor de capacitância faz essa medição utilizando o solo como elemento condensador e é um equipamento muito útil quando são necessárias várias medições. Em adição, são de simples instalação e manutenção, de baixo custo e não despendem de muita energia. Apesar de, com a devida calibração, apresentarem precisões satisfatórias, elevada salinidade pode trazer desafios (Meter Group, 2020).

O sensor de reflectometria de domínio temporal, ou simplesmente TDR, mede o tempo de viagem da onde de energia elétrica recolhida ao longo de uma linha de transmissão, sendo que o tempo de viagem está relacionado com a capacidade de armazenamento de carga do solo e o *w*. Este tipo de sensor contém uma gama de frequências no sinal, isto é, não apenas uma única frequência, o que representa uma mais-valia na redução do erro associado à salinidade do solo (Meter Group, 2020). Todavia, é um recurso dispendioso quando aplicado a uma área extensa, apresenta consumos energéticos relativamente elevados e é uma técnica com uma certa complexidade tecnológica, sendo necessário a presença de um especialista (Campbell, 2014).

Uma outra opção são os sensores FDR que se servem do solo como condensador para medir a frequência ressonante máxima no circuito elétrico e relaciona a frequência ressonante com o *w* (Meter Group, 2020). Contrariamente aos sensores TDR, estes apresentem baixo custo, baixo consumo energético, são de fácil instalação e de uso e recorrem a dispositivos de leitura simples. A adicionar a esses benefícios, apresentam a melhor resolução do que diz respeito a detetar variações de *w*. Porém, alguns são sensíveis à textura do solo e flutuações na temperatura (dependendo na frequência medida) e às falhas de ar no contacto com o solo. Apesar de, de um modo geral, serem de fácil instalação, alguns requerem a instalação em fundo de poço (Campbell, 2014).

Capítulo III

Trabalho experimental

3. Trabalho experimental

3.1. Objetivos do trabalho experimental

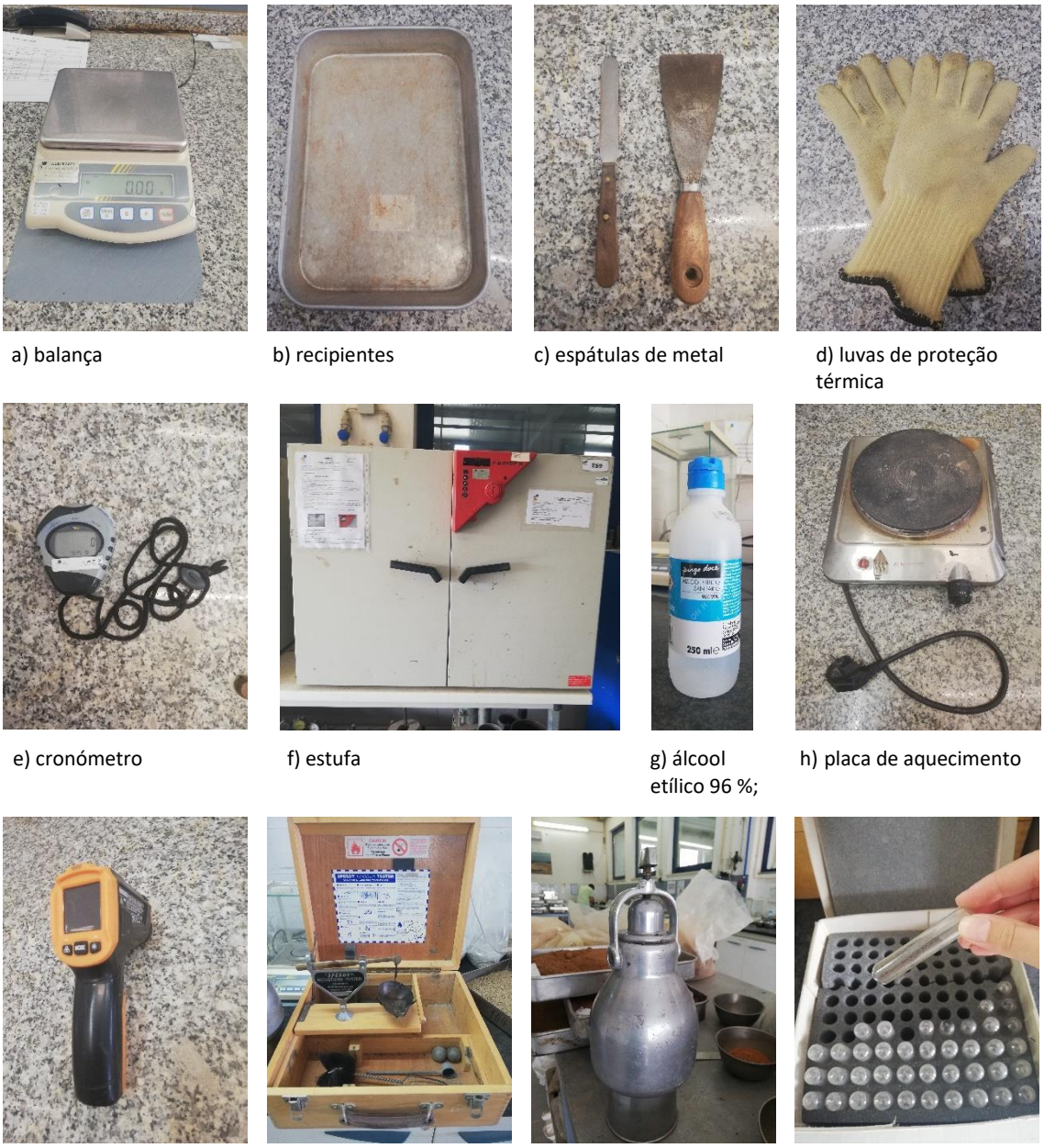
Como já mencionado, a realização do ensaio para a obtenção do teor em água é um ensaio demorado uma vez que é necessário que esta esteja na estufa por 24 h para se obter a massa do material completamente seca. No entanto, e sobretudo em ambiente de obra, nem sempre é possível despender todo esse tempo num só ensaio uma vez que são necessários resultados para se avançar para as próximas etapas, quer elas sejam a realização de outros laboratoriais, quer sejam o avanço na construção do projeto. Assim sendo, foi proposto para objetivo da presente dissertação o estudo dos tempos de secagem de solos em função da sua classificação de modo a perceber se seria possível reduzir o tempo do ensaio o que representaria uma mais-valia no desenvolvimento dos diversos projetos de engenharia e construção.

Pesquisas prévias à realização deste trabalho, indicaram que, não só a classificação do solo poderia influenciar o tempo que o material necessita até se apresentar completamente seco, mas também a quantidade de material que se está a ensaiar, isto é, a sua massa, assim como a quantidade de água que se encontra presente na amostra. Posto isto, outros dos objetivos é perceber se a hipótese de que uma amostra com maior massa e com um teor em água mais elevado demora efetivamente mais tempo a secar é verdadeira.

Por fim, e tendo em conta a vasta gama de métodos para a obtenção do teor em água, o último objetivo foi avaliar o desempenho de outros métodos para atingir o mesmo fim. Para tal, optaram-se pela realização de métodos mais expeditos, nomeadamente o método do aquecimento direto (ASTM D4959-00) método do álcool e método do *speedy* (ASTM D4944-04).

3.2. Planeamento do trabalho experimental

Nesta secção do documento, serão apresentados os procedimentos adotados para a realização prática dos diversos ensaios que foram aplicados a um total de 45 amostras de solo. A identificação e caracterização destas amostras encontra-se descrita no Anexo 1 (e a ilustração das folhas de resultados dos diversos ensaios, no Anexo 5). E a listagem total de material que deu auxílio e permitiu a realização dos ensaios de obtenção do *w*, que são o aspeto principal do estudo aqui apresentado, encontra-se representada na Figura 9.



a) balança b) recipientes c) espátulas de metal d) luvas de proteção térmica

e) cronómetro f) estufa g) álcool etílico 96 %; h) placa de aquecimento

i) termómetro digital j) caixa do equipamento do *speedy* (escova, bolas de aço e balança) k) garrafa speedy **l)** reagente (carbureto de cálcio)

Figura 9: Conjunto de instrumentos utilizados para a realização dos ensaios para obtenção do teor em água.

3.2.1. Ensaios de identificação

Sendo o primeiro objetivo de estudo estabelecer uma relação entre o tempo de secagem do material com a sua classificação, foram realizados os ensaios mínimos de identificação de solos para a classificação unificada e de acordo com a classificação AASHTO. Isto é, o ensaio da análise granulométrica (de acordo com a noma LNEC E 239: 1970), determinação dos limites de consistência (NP143: 1969) e o ensaio de obtenção do teor em água (NP 84: 1965) às amostras de solos que chegavam ao Laboratório Central da Mota-Engil Engenharia & Construção, S.A.

A preparação da amostra para a realização do ensaio da análise granulométrica (LNEC E 239: 1970) inicia-se com uma amostra seca (quer pela ação do ar, quer pela colocação em estufa a 105-110 °C até ser possível trabalhá-la) e, assegurada tal condição, os torrões de maior dimensão são desagregados com a ajuda de um pilão revestido a borracha para que o tamanho natural das partículas não seja alterado. De seguida a amostra de solo é esquartelada de modo a obter uma amostra conforme o Quadro 4.

Quadro 4: Massas mínimas a obter na fração retida no peneiro nº 10, no ensaio da análise granulométrica (Apatado de LNEC E195, 1966).

Diâmetro nominal das maiores partículas (mm)	Massa mínima aproximada da fração retida no peneiro nº10 (g)
9,5 (3/8 ”)	500
19,1 (¾ ”)	1000
25 (1 ”)	2000
37,5 (1 ½ ”)	3000
50 (2 ”)	4000
75 (3 ”)	5000

Após esquartelamento, a amostra é novamente desagregada, por um período de 15 minutos por cada 2000 g de amostra e realiza-se a secagem da amostra em estufa (a 105-110 °C) até peso constante, pesar e registar o valor da massa total da amostra, m_t.

A amostra é de seguida dividida em duas frações por intermédio do peneiro nº10 (2 mm), sendo que o material que ficar retido é novamente desagregado, pelo processo já descrito, e passado novamente no peneiro referido. Este procedimento é repetido até que o material passado seja inferior a 5 % do material retido no peneiro nº 10. O material é depois lavado sobre este peneiro, de forma a retirar o material fino aderente ao material grosso, e seco em estufa (a 105-110 °C) até peso contante e pesar e registar o valor da massa retida, m_{10}. Posto isto, este material é peneirado numa série de peneiros (com as seguintes dimensões: 75 mm (3 ”), 50 mm (2 ”), 37,5 mm (1 ½ ”), 25 mm (1 ”), 19,1 mm (¾ ”), 9,5 mm (3/8 ”), 4,75 mm (nº 4), 2 mm (nº 10), 0.85 mm (nº 20), 0,425 mm (nº 40), 0,250 mm (nº 60), 0,106 mm (nº 140) e 0,075 mm (nº 200)) começando pelo peneiro mais largo. De acordo com LNEC E239:1970, esta peneiração é executada através de movimentos horizontas de translação e rotação (alternadamente no sentido direto e retrógado) com o intuito de manter o material a circular de forma contínua no fundo do peneiro. Este procedimento termina quando se deixa de observar passagem de material, ou quando ao fim de 1 minuto não passar mais de 1% do material retido no peneiro.

Relativamente à fração passada no peneiro nº 10, a este material é feito novo esquartelamento de modo a obter uma quantidade aproximada de 115 g de amostra no caso de solos arenosos, e 65 g no caso de solos argilosos (m_a). De seguida é colocada num gobelé com 250 cm^3 de água em que se

dissolveu previamente 0,5 g de hexametafosfato de sódio comercial. Depois de agitar a mistura e de esta ter repousado, é transferida para o peneiro nº 200 (0,074 mm) onde o solo será lavado. Antes de o material ser passado no peneiro inferior, através do procedimento descrito para a fração retida no peneiro nº 10, este é transferido para um tabuleiro e seco em estufa (a 105-110 °C) até peso contante (LNEC E239, 1970).

A classificação do solo requer ainda a determinação dos limites de consistência (NP143: 1969). Para tal, toma-se cerca de 500 g de amostra e com o auxílio de um almofariz com pilão de borracha, promove-se a desagregação das partículas, mais uma vez sem alteração da granulometria natural, e passa-se o material no peneiro nº 40. Esta ação é repetida até que o material passado no peneiro seja inferior a 5 % do material retido.

A obtenção do limite de liquidez inicia-se com 100 g do material passado à qual se junta água destilada até se formar uma pasta homogénea e consistente. Caso o material seja muito argiloso, recomenda-se deixar o material húmido durante 24 h num recipiente fechado para que a humidade se distribua uniformemente pelas partículas. O ensaio será, depois desta preparação, realizado com recurso a um instrumento denominado de concha de Casagrande, onde é colocada uma porção de material húmido preparado de modo que se obtenha uma camada, não muito comprida, e com a superfície nivelada e com espessura máxima de 1 cm verificada com a introdução do riscador reto perpendicular à superfície da concha. Por fim, é feito um sulco no material deslocando o riscador segundo o diâmetro da concha normal ao eixo da manivela e mantendo-o perpendicular à superfície da concha de modo a dividi-lo a meio. Assim que o ensaio é iniciado, as sucessivas pancadas provocam a união do material e, quando este contacto se der pela parte inferior do sulco numa extensão de cerca de 1 cm, deve-se registar o número de pancadas e retirar sensivelmente 10 g do material que se uniu (com auxílio de uma espátula). Este material, depois de pesado, será seco em estufa a 105-110 °C até que a diferença entre pesagens efetuadas a intervalos de 4h não seja superior a 0,1 % da massa inicial, registando-se, no fim, a massa do material seco. Depois de ensaiado o primeiro provete, serão preparados mais 3 por adição e de novas quantidades de água destilada para que esta se torne mais fluída. Em cada um dos provetes ensaiados, o número de pancadas deve situar-se entre 10 e 40, sendo que em dois dos ensaios este número deverá ser abaixo de 25 e, nos outros dois, acima.

Para a obtenção do limite de plasticidade, tomasse uma porção de 20 g do material passado e executa-se um processo semelhante ao anteriormente descrito relativamente à adição de água destilada até que o solo se torne suficientemente plástico para permitir moldar com facilidade quatro esferas de diâmetro sensivelmente igual. Posto isto, cada uma destas esferas deve ser rolada entre a palma da mão e uma placa de vidro de modo a formar um filamento cilíndrico com

aproximadamente 3 mm. Formar novamente uma esfera e rolá-la de novo, repetindo estas operações até que, devido à perda progressiva de água, isto é, secagem do material, se dê a rotura do filamento criado quando o seu diâmetro for de cerca de 3 mm. Terminado este processo, dever-se-á secar a amostra através do procedimento descrito para a obtenção do limite de liquidez. Todo o conjunto de ações descritos é repetido, à semelhança do que ocorre na determinação acima descrita, para os restantes provetes (NP-143 , 1969).

Terminada a realização destes ensaios, é possível classificar o solo de acordo com as duas principais classificações adotadas mundialmente: a Classificação AASHTO ou Classificação de solos para fins rodoviários (LNEC E240, 1970) e a Classificação Unificada (U.S.C), que se encontram apresentadas no Anexo 2 e 3, respetivamente.

3.2.2. Teor em água natural

A obtenção do teor em água natural foi realizada, como já mencionando, segundo a norma NP 84: 1965, que, de um modo simplificado, recorre à secagem do material em estufa durante um período de 24 h ou até massa constante. Assim, após determinação da massa de um recipiente limpo e seco, o material húmido é colocado neste e pesado novamente. Ambos são colocado na estufa à temperatura de 105-110 °C, sendo novas pesagens efetuadas, de um modo geral, em intervalos de duas horas de modo a aferir o tempo de secagem aproximado do material ensaiado que corresponderá ao número de horas em que diferença entre pesagens efetuadas em intervalos sucessivos não seja superior a 0.1 % da massa inicial do provete. A amostra é mantida em estufa as restantes 24 h sendo determinada a massa seca do material no fim desse período e depois de este ter arrefecido. Deve mencionar-se que o processo é realizado o mais rápido possível após a receção da amostra de modo a minimizar possíveis erros devido a trocas de humidade entre o provete e o ambiente. A Figura 10 representa a sequência de operações executadas para a obtenção do teor em água natural para um total de 45 amostras, mais especificamente 11 de areias não plásticas, 25 de areias com alguma plasticidade, 1 de cascalho, 2 de silte e 6 de argila. Este processo foi realizado em duplicado para cada amostra, sendo o *w* final foi obtido pela média entre os dois resultados, e recorreu ao material identificado com a letra a), b), d), e) e f) da Figura 9.

a) pesagem do recipiente

b) pesagem do recipiente contendo o solo húmido

c) colocação do material em estufa a 105-110 °C

d) efetuar pesagens em intervalos definidos e ao fim de 24 h.

Figura 10: Sequência de operações realizadas para obtenção do teor em água em estufa.

3.2.3. Estudo da influência da massa no tempo de secagem

Uma das hipóteses a verificar com este caso de estudo era a influência que a quantidade de amostra ensaiada poderia ter no tempo de secagem, isto é, se amostras com mais massa efetivamente demoravam mais tempo a secar. Para o efeito, começou-se por optar por uma amostra de areia argilosa com cascalho bem graduada (identificada como A1198/17 e classificada como SW-SC pela classificação unificada e A-2-7(0) pela AASHTO) e, tendo esquartelado o material de modo a obter amostras representativas, simularam-se dez provetes com 30, 70, 100, 200, 300, 400, 500, 1000, 1500 e 2000 g, com teores em água semelhantes. Esta amostra apresenta uma particularidade: já estava reservada no LABC da MEEC, tendo já ter sido realizados todos os ensaios pretendidos pelo cliente que disponibilizou a amostra, pelo que nenhum foi realizado pelo autor deste documento. Isto é, todos os valores usados, incluindo o do teor em água que se optou por aplicar na amostra para esta verificação foi fornecido pelo arquivo da empresa.

O procedimento, como se devia de esperar, foi em tudo semelhante ao descrito anteriormente, com a exceção de se ter de induzir o teor em água pretendido. Para tal recorreu-se ao material identificado coma a letra a), b), c) d), e) e f) da Figura 9., tendo-se começado por secar a amostra

em estufa e para além da determinação da massa do recipiente, registou-se a massa de solo a ensaiar de modo a determinar a quantidade de água a adicionar necessária para se obter um teor em água específico, que neste caso, rondava os 7,5 %. De seguida, é fundamental homogeneizar a amostra e realizar os restantes passos referido na obtenção do teor em água natural. O procedimento realizado encontra-se ilustrado de forma simplificada na Figura 11, e foi realizado em dobro para cada massa (perfazendo um total de 20 ensaios).

a) pesagem do recipiente

b) pesagem do recipiente com solo seco

c) adição da quantidade de água necessário para atingir w pretendido

d) homogeneizar

e) pesagem do recipiente com solo húmido

f) efetuar pesagens em intervalos definidos e ao fim de 24 h

Figura 11: Sequência de operações para verificar influência da massa no tempo de secagem de amostras de solos.

Com o intuito de se observar as diferenças nos tempos de secagem e tendo em consideração a hipótese de que amostras maiores demorariam mais tempo a secar completamente o material, foram efetuadas pesagens com diferentes intervalos de tempo consoante a massa da amostra. Assim, em amostras com massas compreendidas entre 1000 e 2000 g as pesagens foram realizadas a cada duas horas, entre 300 e 500 g a cada hora e nas de massa inferior a cada trinta minutos.

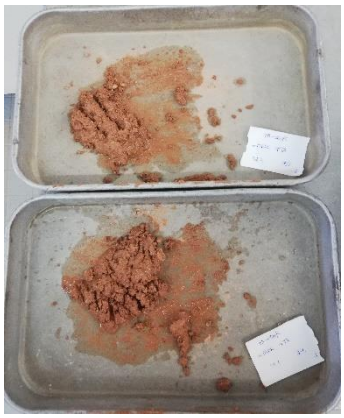
Uma vez que o teor em água é um dos fatores mais importante no comportamento de solos argilosos, achou-se por bem realizar o mesmo teste numa amostra de argila magra arenosa (identificada como A0797/22 e classificada como CL pela classificação unificada e A-6(10) pela AASHTO). Contudo, devido à falta de material disponível em laboratório, apenas foi possível estudar

tal hipótese em amostras de 1000, 500, 400, 300, 200, 100, 70 e 30 g, com apenas um ensaio para cada massa, mas o processo, com exceção deste pormenor, foi em tudo semelhante. Assim foram realizados 8 ensaios para esta amostra de solo.

3.2.4. Estudo da influência da percentagem de teor em água no tempo de secagem

Para verificar a influência que uma maior quantidade de água presente numa amostra de solo teria no tempo de secagem da mesma, realizou-se o mesmo conjunto de operações mencionadas na verificação anterior, mas para amostras com cerca de 200 g e com *w* de 10, 20, 30, 40 e 50 %. O procedimento foi realizado para a amostra anterior, ou seja na de areia argilosa com cascalho bem graduada (identificada como A1198/17 e classificada como SW-SC pela classificação unificada e A-2-7(0) pela AASHTO) (Figura 12) e uma de argila magra arenosa (identificada como A0791/22 e classificada como CL pela classificação unificada e A-6(9) pela AASHTO) (Figura 13), com auxílio do material usado no ensaio anterior. De entre as amostras de argila existentes, optou-se por esta por ser a que apresentava maior índice de plasticidade.

a) w de 10 %



b) w de 20 %

c) w de 30 %

d) w de 40 %

e) w de 50 %

Figura 12: Estudo da influência do w no tempo de secagem de uma areia (A1198/17).

a) w de 10 %

b) w de 20 %

e) w de 50 %

c) w de 30 %

d) w de 40 %

Figura 13: Estudo da influência do w no tempo de secagem de uma argila (A0791/22).

3.2.5. Seleção das amostras para obtenção do teor em água por métodos expeditos

O presente documento envolve ainda o estudo da fiabilidade de outros métodos do teor em água, no entanto, por uma questão de falta de material disponível em várias amostras e pelas limitações impostas pelo tempo e equipamento disponível no LABC, foi necessário fazer uma seleção das amostras existentes onde seriam aplicados os outros métodos, sendo eles o método do aquecimento direto com recurso a placa de aquecimento, combustão de álcool e *speedy*.

Para fazer a seleção, numa primeira fase dividiram-se as amostras de acordo com o a sua classificação, obtendo-se essencialmente quatro grupos: areias, cascalhos, silte a argilas. Devido à grande diversidade de areias, optou-se por subdividir este grupo em dois: areias não plásticas (areias NP) e areias com alguma plasticidade (areias LL) tendo em conta a influência que esse parâmetro tem no teor em água. Desta forma, nas amostras ficaram subdividas de acordo com Quadro 5.

Quadro 5: Grupos de amostras estudadas, de acordo com classificação.

Classificação	Número de amostras
Areias NP	11
Areias LL	25
Cascalho	1
Siltes	2
Argilas	6

Depois de agrupadas as amostras, tentou-se escolher 3 amostras de cada grupo sendo uma com índice de plasticidade baixo, outra com médio e outra com o IP maior com o intuito de, dentro das limitações, estudar amostras mais variadas possível. Todavia, não foi possível realizar tal

procedimento em todos os subgrupos. Pela análise do Quadro 2, é percetível o motivo uma vez apenas tinha sido determinado o *w* natural de uma amostra de cascalho e que já não se encontrava disponível no laboratório quando este estudo se tornou um objetivo, não podendo ser realizado nenhum ensaio em amostras de cascalho. Visto que apenas havia duas amostras de silte ao dispor, foram realizados os ensaios em ambas as amostras.

Nas amostras de argila, a seleção foi mais simples e não só foi possível optar por amostras que se enquadravam com o critério definido para o IP, como foi possível estudar um *w* mais baixo e mais alto de entre todas as amostras de argila e ainda um intermédio.

Relativamente às amostras de areia com plasticidade associada realizou-se ensaios na amostra com maior IP (A0798/22), na amostra com IP médio e com menor *w* (A0543/22) uma vez que era a amostra que apresentava o menor de todo o grupo e por fim, de entre as amostras com menor IP a que apresenta um *w* mais elevado pois iria representar o *w* intermédio neste grupo de amostras (A0771/22).

Finalmente, nas amostras de areias não plásticas, visto que não era possível fazer a escolha com base no IP, esta foi feita através da análise da percentagem de finos uma vez que, como já estudado, é nestes que o comportamento é mais influenciado pela água absorvida, e pelo *w* das amostras para se obter a maior variedade possível. Assim, de entre as amostras de areia siltosa, que correspondiam às amostras com maior percentagem de finos, selecionou-se aquela que apresentava material suficiente para a realização dos todos os ensaios (A0603/22). O mesmo critério foi aplicado para a escolha das amostras com menor percentagem de finos (A0541/22), assim como para uma percentagem de finos intermédia (A0680/22). Neste grupo, a principal dificuldade foi a existência de material suficiente para a realização dos três métodos, daí ter sido essencialmente esse o critério para a seleção das amostras deste grupo.

Mais tarde, depois de uma breve análise dos resultados até então obtidos, decidiu-se aprofundar o estudo destes métodos realizando mais ensaios práticos em amostras de uma classificação em específico. Devido, mais uma vez à limitação relativa ao material existente em laboratório, optou-se por realizar mais 6 ensaios em amostras de areias LL (perfazendo um total de 9 ensaios em solos caracterizados como areias com alguma plasticidade associada). A seleção destas amostras foi, mais uma vez, feita com base nos índices de plasticidade e teores em água, optando-se nesta secção por escolher amostras com características intermédias e diferenciadas relativamente às até então selecionadas. No Quadro 6 são apresentadas as amostras selecionadas para a realização dos métodos expeditos de obtenção do *w*, sendo eles o método do aquecimento direto, da combustão do álcool e do *speedy*, descritos nos pontos seguintes deste capítulo.

Quadro 6: Listagem de amostras utilizadas para realizados dos métodos expeditos para obtenção do *w*.

	Amostra	Litologia	Teor em água	Análise granulométrica											Limites de Consistência			Classificação	
			w	P#1 1/2"	P#1"	P#3/4"	P#3/8"	P#nº4	P#nº10	P#nº20	P#nº40	P#nº60	P#nº140	P#nº200	L.L.	L.P.	I.P.	AASTHO	UNIF.
			(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)		
Areias NP	A0541/22	Areia mal graduada com silte	5,1	-	100,0	99,7	95,8	92,8	88,5	76,0	32,8	14,7	11,1	10,1	NP	NP	NP	A-1-b(0)	SP-SM
	A0680/22	Areia siltosa com cascalho	9,7	100,0	99,0	98,4	97,2	96,1	84,4	55,4	38,8	28,9	17,6	14,4	NP	NP	NP	A-1-b(0)	SM
	A0603/22	Areia siltosa	16,9	-	-	-	100,0	98,6	86,4	61,3	45,3	34,6	23,2	19,8	NP	NP	NP	A-1-b (0)	SM
Areias LL	A0543/22	Areia argilosa com cascalho	0,6	-	100,0	98,7	91,8	84,1	70,5	49,5	33,1	25,6	20,9	20,0	29	16	13	A-2-6(0)	SC
	A0771/22	Areia siltosa com cascalho	9,5	86,4	80,1	74,7	66,0	55,8	48,1	37,6	31,2	26,8	21,3	19,7	29	24	5	A-1-b(0)	SM
	A0798/22	Areia argilosa	20,4	-	-	100,0	99,1	97,7	91,1	80,8	72,6	62,9	48,6	45,2	65	25	40	A-7-6(9)	SC
	A0539.22	Areia argilosa	5,8	100,0	99,4	99,2	97,3	94,7	85,9	72,2	51,2	38,3	30,8	29,1	24	14	10	A-2-4(0)	SC
	A0540.22	Areia argilosa	6,5	-	-	100,0	98,7	96,3	87,7	51,3	21,1	15,2	12,9	12,5	35	17	18	A-2-6(0)	SC
	A0542.22	Areia argilo-siltosa	0,7	-	100,0	98,6	94,8	90,4	81,4	67,7	55,0	48,7	44,1	42,6	21	14	7	A-4(2)	SC-SM
	A0545.22	Areia argilosa	1,0	-	-	100,0	99,6	97,3	86,6	58,0	37,8	29,0	24,4	23,1	32	18	14	A-2-6(0)	SC
	A0793.22	Areia siltosa	23,4	-	-	100,00	98,59	95,52	88,76	67,76	56,29	48,70	39,22	36,29	53	30	23	A-7-5(3)	SM
	A0794.22	Areia siltosa	24,7	-	-	-	-	100,00	92,27	67,26	52,05	42,40	31,97	29,37	64	35	29	A-2-7(3)	SM
Silte	A0795/22	Silte arenoso	32,0	-	-	-	100,00	99,75	99,32	98,97	97,84	94,61	83,00	68,53	NP	NP	NP	A-4(7)	ML
	A0597/22	Silte elástico arenoso	33,7	-	-	-	100,0	99,3	90,1	78,4	69,5	63,9	55,7	52,8	63	46	17	A-7-5 (8)	MH
Argila	A0544/22	Argila siltosa	0,9	-	-	100,0	99,9	98,4	90,8	89,1	87,4	86,7	86,2	86,0	19	14	5	A-4(8)	CL-ML
	A0791/22	Argila magra arenosa	3,8	-	-	-	100,00	99,85	98,04	94,06	88,33	79,88	61,61	57,90	40	19	21	A-6(9)	CL
	A0792/22	Argila magra arenosa	16,0	-	100,00	99,40	96,32	93,01	87,74	85,14	82,12	77,43	64,97	59,98	31	17	14	A-6(7)	CL

3.2.6. *Método do aquecimento direto*

A aplicação do método do aquecimento direto foi realizada com recurso a uma placa de aquecimento e o procedimento de ensaio, como anteriormente especificado, é bastante semelhante ao do método padrão, diferindo no meio de aquecimento e no controlo da temperatura que neste ensaio é necessário. Assim, a massa das amostras foi determinada com base no Quadro 2 e estas encontram-se indicadas no Quadro 7. Nas amostras que não se enquadravam em nenhum dos requisitos, optou-se por utilizar a mesma quantidade de material que as restantes vinham indicando (ou seja, entre 200 e 300 g).

O teor em água foi induzido nas amostras através da adição da quantidade de água necessário para ser obtido um teor em água igual ao *w* natural obtido em estufa e, dependo deste, foram efetuadas pesagens a cada 2 minutos sendo que em amostras com *w* elevados não foram efetuadas pesagens nos 5 a 10 minutos iniciais, tendo essa opção sido tomada através da visualização do estado de secagem do solo em questão. Durante a execução do ensaio, foi fundamental recorrer a espátulas para mexer cuidadosamente o material assim como a verificação frequente da temperatura a que o material se encontrava de modo a evitar sobreaquecimento.

Posto isto, o material utilizado na execução deste ensaio encontra-se identificado com a letra a), b), c) d), e) e i) na Figura 9, e o conjunto de operações realizado ilustrados na Figura 14.

Quadro 7: Determinação da massa das amostras a ensaiar no método de aquecimento direto.

Amostra	**Teor em água - *w***	**Análise granulométrica (retidos)**			**Massa a ensaiar – m**
		P#3/4"	P#nº4	P#nº10	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(g)
A0541/22	5,1	0,3	7,2	14,5	200 a 300
A0680/22	9,7	1,6	3,9	5,6	200 - 300
A0603/22	16,9	0	1,4	13,6	200 a 300
A0543/22	0,6	1,3	5,9	29,5	200 a 300
A0771/22	9,5	25,3	44,2	51,9	200 a 300
A0798/22	20,4	0	2,3	8,9	200 - 300
A0539/22	5,8	0,8	5,3	14,1	200 a 300
A0540/22	6,5	0	3,7	12,3	200 a 300
A0542/22	0,7	1,4	9,6	18,6	200 a 300
A0545/22	1,0	0	2,7	13,4	200 a 300
A0793/22	23,4	0	4,48	11,24	200 a 300
A0794/22	24,7	0	0	7,73	200 - 300
A0795/22	32	0	0,25	0,68	200 - 300
A0597/22	33,7	0	0,7	9,9	200 - 300
A0544/22	0,9	0	1,6	9,2	200 - 300
A0791/22	3,8	0	0,15	1,86	200 - 300
A0792/22	16	0,6	6,99	12,26	200 a 300

a) pesagem do recipiente

b) adição da quantidade de água necessário para atingir w pretendido

c) homogeneização da amostra

d) pesagem do recipiente com solo húmido

e) colocar a amostra sobre a placa de aquecimento e iniciar contagem do tempo

f) mexer cuidadosamente a amostra, com auxílio da espátula

g) controlo da temperatura com termómetro digital

h) pesagens ao recipiente com o solo ainda húmido e pesagem final com solo completamente seco.

Figura 14: Sequência de operações realizadas para obtenção do w pelo método do aquecimento direto.

3.2.7. Método da combustão do álcool

O método da combustão do álcool passa, como já referido e como o próprio nome indica, pela adição de álcool a uma amostra de solo e posterior colocação deste em combustão. A quantidade de álcool adicionado é proporcional à massa do solo e, tendo por base vários dos estudos referidos no ponto 2.3.3 do presente documento, optou-se pela aplicação a amostras com cerca de 30 g com três combustões de álcool.

O procedimento inicia-se da mesma maneira que os ensaios já mencionados, isto é, pela preparação da amostra com o teor em água pretendido, sendo adicionado o álcool em igual quantidade à amostra que se está a ensaiar. Terminada a combustão do álcool, o material é deixado a arrefecer, sendo a pesagem feita quando a amostra já se encontrar fria. O conjunto de operações realizadas encontra-se ilustrado na Figura 15, e recorreu ao material identificado com a letra a), b),

c) d), e) e g) na Figura 9. Em h) da mesma figura, é possível observar o estado em que o material fica depois da realização do ensaio, reforçando a impossibilidade de realizar quaisquer outros ensaios com o material.

Apesar de já se saber que o método é bastante mais rápido que o método padrão, tomou-se a iniciativa de determinar o tempo de cada combustão com o intuito de perceber se a quantidade de água presente na amostra influenciaria também o tempo de combustão.

a) pesagem do recipiente

b) adição da quantidade de água necessário para atingir w pretendido

c) homogeneização da amostra

d) pesagem do recipiente com solo húmido

e) adição do álcool em quantidade proporcional à massa da amostra

f) distribuição do álcool por toda a amostra

g) iniciar combustão do álcool

h) pesagem do recipiente com solo seco

Figura 15: Sequência de operações para obtenção do w pelo método de combustão do álcool.

3.2.8. Método do speedy

Como mencionado anteriormente, o método do *speedy* permite obter o teor em água da massa húmida de um solo através da reação química entre o carbureto de cálcio e o hidrogénio presente nas moléculas de água. O material necessário para a aplicação prática deste método vem quase toda com o equipamento, com a exceção do reagente que, devido ao prazo de validade, pode ser adquirido à parte. Todo este material encontra-se ilustrado na Figura 9 e identificado com as letras b), c), f), k) e l). À semelhança do que ocorreu com os métodos anteriores, foi necessário preparar a amostra com o *w* pretendido, tendo este ensaio a particularidade de não poderem ser ensaiadas partículas com dimensões superiores a 4,75 mm (isto é, que fiquem retidas no peneiro nº 4 da ASTM). Visto que a maioria das amostras selecionadas para a realização deste ensaio não cumpriam com este critério, foi necessário remover esta fração das amostras a ensaiar e só posteriormente pesar com a balança que acompanha o equipamento até que o pendulo esteja à mesma altura que a linha vermelha (como se pode ver em b) na Figura 16). Depois da colocação do material a ensaiar, juntamente com as bolas de aço e o reagente, é fundamental ter o cuidado de não partir a cápsula que retém o reagente para não iniciar o processo de secagem e consequente perda de registo de pressões antes que o equipamento esteja fechado, sendo ainda importantíssimo que este seja fechado corretamente, pelo mesmo motivo. Mexer vigorosamente o material de modo que as bolas de aço introduzidas realizem movimentos circulares nas paredes do equipamento é outro aspeto fundamental para promover a quebra da cápsula e total envolvência do reagente com o solo. Em i) da Figura 9 é possível observar o estado em que a amostra se encontra antes da realização do ensaio e depois de ter ocorrido a reação química, reforçando, à semelhança do ensaio da combustão do álcool, a impossibilidade de recorrer ao material ensaiado por este método para a realização de outro ou de qualquer repetição.

a) determinação da quantidade de solo a colocar no equipamento

b) obtenção da quantidade de solo necessária

c) colocação do material dentro do equipamento

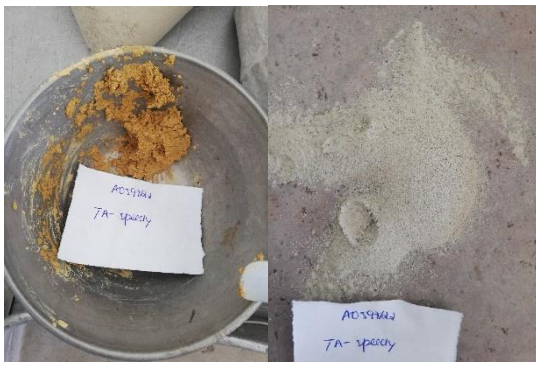
d) adição das bolas de aço

e) adição do reagente

f) fechar corretamente o equipamento

g) mexer o equipamento de modo a causar o movimento circular das bolas de aço dentro do *speedy*;

h) valor de w da massa húmida obtido pelo



i) aspeto do material antes da realização do ensaio (imagem da esquerda) e depois de ter ocorrido secagem por reação química (imagem da direita) (amostra identificada como A0597/22).

Figura 16: Sequência de operações para obtenção do *w* pelo método do speedy.

Capítulo IV

Análise crítica dos resultados

4. Análise crítica dos resultados

4.1. Influência da massa no tempo de secagem

A realização do ensaio de obtenção do *w* em estufa com diferentes massas da mesma amostra e por aplicação do mesmo teor em água permitiu confirmar a hipótese inicial: amostras com maiores quantidades de material efetivamente necessitam de mais tempo para secarem por completo. Tal observação se comprovou quer na amostra de areia (Quadro 8), quer na de argila (Quadro 9), sendo a diferença nos tempos notória: enquanto uma amostra de 30 g se encontra seca em cerca de 30 minutos (ambos os tipos de solo), uma de 1000 g, do mesmo material (e em ambos os casos) necessita de, pelo menos, 1h30. Constatou-se ainda que uma amostra com 2000 g de areia requer, no mínimo, 3 h. Estas conclusões foram tiradas para amostras com *w* semelhante.

Quadro 8: Tempos de secagem de amostras de areia (A1198/17) com diferentes massas e *w* semelhante.

Amostra (A1198/17)	**Litologia**	**Classificação**		**Limites de Consistência**			**Teor em água**	**Tempo de secagem**	**Massa amostra inicial**
		AASTHO	UNIF.	L.L.	L.P.	I.P.	w	t	m
				(%)	(%)	(%)	(%)	(h)	(g)
m2000	Areia argilosa com cascalho bem graduada	A-2-7 (0)	SW-SC	50,0	26,0	24,0	7,9	3,0	2154,0
m1500							7,7	2,0	1596,5
m1000							8,0	1,5	1116,2
m500							8,2	1,0	513,7
m400							8,2	1,0	388,3
m300							7,7	1,0	293,1
m200							7,7	0,5	203,3
m100							7,5	0,5	108,8
m70							7,0	0,5	70,5
m30							7,2	0,5	28,6

Quadro 9: Tempos de secagem de amostras de argila (A0797/22) com diferentes massas e *w* semelhante.

Amostra (A0797/22)	**Litologia**	**Classificação**		**Limites de Consistência**			**Teor em água**	**Tempo de secagem**	**Massa amostra inicial**
		AASTHO	UNIF.	L.L.	L.P.	I.P.	w	t	m
				(%)	(%)	(%)	(%)	(h)	(g)
m1000	Argila magra arenosa	A-6(9)	CL	37,0	17,0	20,0	8,1	1,5	1115,1
m500							8,8	1,0	531,4
m400							8,3	1,0	431,7
m300							8,5	1,0	323,3
m200							9,1	0,5	212,6
m100							8,0	0,5	107,8
m70							7,9	0,5	69,8
m30							8,3	0,5	32,2

4.2. Influência do teor em água no tempo de secagem

Ao contrário do que se constatou na verificação anterior, a influência da quantidade de água presente numa amostra de areia não foi a mesma que numa de argila. Para além das diferenças visuais que se verificaram durante a realização do ensaio, e que são percetíveis nas Figura 12 e 13, os tempos de secagem obtidos não tiverem a mesmo evolução. Amostras de areia com diferentes teores em água demoram maioritariamente todas o mesmo tempo a secar, com exceção da amostra com *w* de 10 % (que demorou, no mínimo, menos 15 minutos)(

Quadro 10). Tendo em conta o comportamento deste tipo de material, esta conclusão seria algo previsível uma vez que o comportamento de solo granulares não é determinado pelo *w*, mas sim pela forma e dimensão das partículas que o constituem. O simples facto de os grãos serem maiores, não só promove a passagem da água por entre os espaços vazios deixados pelos mesmos, como também diminui a superfície específica e, por consequência, torna desprezáveis as forças de superfície.

O mesmo estudo realizado em argilas permitiu concluir que efetivamente, neste tipo de solos, maiores quantidades de água necessitam de mais tempo em estufa para secarem completamente. No

Quadro 11, é possível constatar que o aumento do teor em água é acompanhado pelo incremento do tempo de secagem. A única exceção foi a amostra com *w* de 50 % (W50) que obteve um tempo de secagem menor que amostras com *w* de 30 e 40 %, mesmo após várias repetições. Os resultados obtidos, com exceção da amostra W50, são plausíveis visto que, as partículas argilosas apresentam dimensões reduzidas, o que se reflete numa superfície especifica maior. Esta, por sua vez, associada ao número de cargas elétricas nas faces das partículas tem como consequência o aumento da capacidade de absorção de moléculas de água e sais. Tal influência o comportamento do solo, como também o tempo de secagem do mesmo.

Quadro 10: Tempos de secagem de amostras de areia (A1198/17) com diferente *w* e massa semelhante (método gravimétrico).

Amostra (A1198/17)	Litologia	Classificação		Limites de Consistência			Teor em água	Tempo de secagem	Massa amostra inicial
		AASTHO	UNIF.	L.L.	L.P.	I.P.	w	t	m
				(%)	(%)	(%)	(%)	(h)	(g)
W10	Areia argilosa com cascalho bem graduada	A-2-7 (0)	SW-SC	50,0	26,0	24,0	9,7	30,0	195,6
W20							21,4	45,0	197,7
W30							29,4	45,0	202,3
W40							38,8	45,0	199,5
W50							47,5	45,0	205,6

Quadro 11: Tempos de secagem de amostras de argila (A0797/22) com diferente *w* e massa semelhante (método gravimétrico).

Amostra (A0797/22)	Litologia	Classificação		Limites de Consistência			Teor em água	Tempo de secagem	Massa amostra inicial
		AASTHO	UNIF.	L.L.	L.P.	I.P.	w	t	m
				(%)	(%)	(%)	(%)	(h)	(g)
W10	Argila magra arenosa	A-6(9)	CL	40,0	19,0	21,0	10,0	30,0	193,9
W20							19,2	60,0	195,1
W30							28,6	105,0	196,5
W40							39,4	105,0	191,5
W50							51,9	75,0	196,1

4.3. Tempos de secagem do teor em água natural

Como mencionado no capítulo referente ao planeamento experimental, foram realizados 45 ensaios para a obtenção do *w* e, em simultâneo, determinados os tempos de secagem em estufa. Todos os resultados encontram-se discriminados no Anexo 4.

A análise, única e exclusiva, das amostras classificadas como areias NP (Quadro 12), permitiu concluir, para intervalos de medições de 2 h, que diferenças entre *w* e massa não apresentaram grande influência no tempo de secagem mínimo (*t*). Tal afirmação é suportada pelo facto de todos os tempos de secagem obtidos terem sido iguais a 2 h sendo que o grupo ensaiado apresenta massas compreendidas entre 200 e 1500 g e *w* com valores entre 2,5 e 21,8 %. Um estudo mais detalhado, permitiu concluir que em amostras com massa até 500 g (6 amostras), independentemente do *w*, o tempo de secagem é de 2 h mesmo em amostras com *w* de 21, 8 %

(A0598/22). Acrescenta-se que estes resultados são concordantes com os descritos nos pontos anteriores presentes neste capítulo.

Quadro 12: Tempos de secagem de amostras de areia NP (método gravimétrico).

Amostra	Litologia	Classificação		Limites de Consistência			Teor em água	Tempo de secagem	Massa amostra inicial
		AASTHO	UNIF.	L.L.	L.P.	I.P.	w	t	m
				(%)	(%)	(%)	(%)	(h)	(g)
A0548.22	Areia siltosa com cascalho	A-1-b(0)	SM				0,2		1275,1
A0522.22	Areia bem graduada com silte	A-1-b(0)	SW-SM				2,5		3293,3
A0541.22	Areia mal graduada com silte	A-1-b(0)	SP-SM				5,1		2278,0
A0955.22	Areia siltosa	A-1-b(0)	SM				6,0		943,5
A0680.22	Areia siltosa com cascalho	A-1-b(0)	SM				9,7		1509,5
A0602.22	Areia siltosa	A-1-b(0)	SM	NP	NP	NP	12,0	2,0	295,4
A0601.22	Areia siltosa	A-1-b(0)	SM				13,1		279,9
A0603.22	Areia siltosa	A-1-b(0)	SM				16,9		349,7
A0605.22	Areia siltosa	A-1-b(0)	SM				17,4		263,5
A0600.22	Areia siltosa	A-1-b(0)	SM				18,3		254,6
A0598.22	Areia siltosa	A-4 (0)	SM				21,8		277,2

O estudo comparativo entre areias NP e areias LL (Quadro 13) permitiu reforçar a hipótese inicial de que os tempos de secagem dos solos está associado à classificação dos mesmos. Tal é visível nas amostras de areias com alguma plasticidade que, nas mesmas condições das areias NP descritas anteriormente (isto, é: massa inferior ou igual a 500 g e *w* menor que 22 %), apresentam tempos de secagem superiores, mais especificamente, cerca de 4 h em vez de 2 h. A observação dos resultados de A0598/22, A0600/22 a A6003/22 e A0605/22 (amostra de areias NP) em comparação com os da A0798/22 (amostra de areia LL) comprovam esta questão, indicando que amostras onde os valores de massa e *w* são semelhantes, aquelas que forem constituídas por material argiloso/plástico apresentarão tempos de secagem maiores.

Em concordância com os resultados obtidos no subcapítulo 4.1, verificou-se que as amostras com *w* inferior a 10 % e com massas inferiores a 1500 g necessitam de aproximadamente 2 h na estufa, à semelhança do que se confirmou nas areias NP. As amostras A0579/22, A580/22, A0581/22, A0716/22, A0718/22, A0719/22, A0721/22, A0723/22 e A0770/22 (Quadro 13), comprovam essa afirmação. Além disso, ficou claro que amostras com massas superiores a 1500 g (e *w* inferior a

10 %) precisam de mais de 2 h para secarem por completo (A0539/22, A0540/22, A0771/22 e A0773/22 no Quadro 13).

Quadro 13: Tempos de secagem de amostras de areia LL (método gravimétrico).

Amostra	Litologia	Classificação		Limites de Consistência			Teor em água	Tempo de secagem	Massa amostra inicial
		AASTHO	UNIF.	L.L.	L.P.	I.P.	w	t	m
				(%)	(%)	(%)	(%)	(h)	(g)
A0547.22	Areia argilo-siltosa com cascalho	A-2-4(0)	SC-SM	22	15	7	0,5	2,0	1732,6
A0543.22	Areia argilosa com cascalho	A-2-6(0)	SC	29	16	13	0,6	2,0	1812,8
A0542.22	Areia argilo-siltosa	A-4(2)	SC-SM	21	14	7	0,7	2,0	3016,9
A0545.22	Areia argilosa	A-2-6(0)	SC	32	18	14	1,0	2,0	2389,9
A0546.22	Areia argilosa com cascalho	A-6(4)	SC	39	25	14	2,6	2,0	1512,4
A0721.22	Areia argilo-siltosa com cascalho	A-2-4(0)	SC-SM	24	17	7	5,2	2,0	1066,6
A0579.22	Areia mal graduada com argila e cascalho	A-2-6(0)	SP-SC	32	17	15	5,5	2,0	754,2
A0539.22	Areia argilosa	A-2-4(0)	SC	24	14	10	5,8	3,0	2759,1
A0723.22	Areia argilo-siltosa com cascalho	A-1-a(0)	SC-SM	25	19	6	6,2	2,0	1031,3
A0540.22	Areia argilosa	A-2-6(0)	SC	35	17	18	6,5	3,0	1580,3
A0580.22	Areia argilo-siltosa	A-4(0)	SC-SM	18	13	5	6,8	2,0	783,2
A0770.22	Areia argilo-siltosa com cascalho	A-1-b(0)	SC-SM	23	18	5	7,1	2,0	1485,6
A0716.22	Areia argilosa com cascalho	A-2-4(0)	SC	28	20	8	8,2	2,0	835,1
A0718.22	Areia argilo-siltosa com cascalho	A-1-b(0)	SC-SM	26	20	6	8,3	2,0	1043,6
A0773.22	Areia argilo-siltosa com cascalho	A-2-4(0)	SC-SM	26	20	6	8,5	4,0	1921,9
A0719.22	Areia siltosa com cascalho	A-2-4(0)	SM	30	23	7	9,0	2,0	824,7
A0771.22	Areia siltosa com cascalho	A-1-b(0)	SM	29	24	5	9,5	4,0	2018,6
A0581.22	Areia argilosa	A-2-6(0)	SC	28	16	12	9,9	2,0	982,7
A0772.22	Areia siltosa com cascalho	A-2-4(0)	SM	31	25	6	11,3	2,0	1221,0
A0599.22	Areia siltosa	A-4 (1)	SM	38	28	10	15,3	4,0	1436,6
A0604.22	Areia siltosa	A-7-5 (8)	SM	54	36	18	17,8	6,0	1161,3
A0798.22	Areia argilosa	A-7-6(9)	SC	65	25	40	20,4	4,0	76,5
A0606.22	Areia siltosa	A-7-5 (3)	SM	44	31	13	23,0	4,0	815,7
A0793.22	Areia siltosa	A-7-5(3)	SM	53	30	23	23,4	6,0	1329,2
A0794.22	Areia siltosa	A-2-7(3)	SM	64	35	29	24,7	5,0	872,9

A exploração dos dados obtidos referentes às areias com limites de consistência permitiu ainda concluir que em amostras com massa semelhantes, o tempo de secagem aumenta tendencialmente com o aumento do *w* e do IP (índice de plasticidade). Esta asserção pode ser comprovada por diversas amostras, nomeadamente: A0719/22 e A0606/22 que têm a mesma massa ensaiada, mas a amostra com o dobro do *w*, e de IP (A0606/22), demora duas vezes mais tempo a secar; A0770/22 e A0599/22 apresentam resultados semelhantes aos agora descritos; e pode afirmar-se que algo análogo ocorre entre A0721/22 - A0604/22 e A0599/22 - A0793/22. Nestas, é percetível que, com apenas uma diferença mínima de 100 g, as amostras com *w* e IP significativamente maior (A0604/22 e A0793/22) demoraram expressivamente mais tempo a secar, havendo uma diferença de sensivelmente 4 h, no primeiro conjunto mencionado e de 2 h, no segundo. Uma investigação mais atenta aos resultados permitiu ainda apurar que, mesmo em amostras onde os valores de massa ensaiada e do *w* são semelhantes, aquelas com tempo de secagem maior são as que apresentam um IP mais elevado, como se verifica em A0606/22 e A0794/22. A diferença entre elas reside no facto de esta última possuir mais de o dobro do IP, tendo tal resultado num tempo de secagem um pouco superior. A amostra A0798/22, evidencia ainda mais a influência do IP, dado que apesar de apresentar uma massa reduzida (inferior a 80 g), necessitou do mesmo tempo em estufa (4 h) que uma amostra com uma massa significativamente superior (cerca de 800 g) e até mesmo um *w* mais elevado (A0606/22). A principal diferença está associada ao IP de cada uma sendo que em A0606/22 corresponde a 13, e em a A0798/22 a 40.

Quanto às amostras de cascalho e silte onde foi determinado o *w*, não é possível concluir algo concreto visto que o número de amostras disponível deste tipo de material foi reduzido. Todavia, apresentam-se os resultados obtidos nos Quadros Quadro 14 e

Quadro 15, respetivamente.

Quadro 14: Tempo de secagem da amostra de cascalho (método gravimétrico).

Amostra	**Litologia**	**Classificação**		**Limites de Consistência**			**Teor em água**	**Tempo de secagem**	**Massa amostra inicial**
		AASTHO	UNIF.	L.L.	L.P.	I.P.	w	t	m
				(%)	(%)	(%)	(%)	(h)	(g)
A0954.22	Cascalho argiloso com areia	A-6(1)	GC	31	20	11	6,1	>8,0	6471,8

Quadro 15: Tempos de secagem de amostras de silte (método gravimétrico).

Amostra	**Litologia**	**Classificação**		**Limites de Consistência**			**Teor em água**	**Tempo de secagem**	**Massa amostra inicial**
		AASTHO	UNIF.	L.L.	L.P.	I.P.	w	t	m
				(%)	(%)	(%)	(%)	(h)	(g)

A0795.22	Silte arenoso	A-4(7)	ML	NP	NP	NP	32,0	6,0	265,3
A0597.22	Silte elástico arenoso	A-7-5 (8)	MH	63	46	17	33,7	4,0	874,2

Por fim, foi feita a mesma investigação para argilas que, apesar da amostragem reduzida, permitiu chegar a algumas conclusões através da comparação destas com as areias NP e areias LL, sendo os resultados descritos no Quadro 16.

Quadro 16: Tempos de secagem de amostras de argila (método gravimétrico).

Amostra	**Litologia**	**Classificação**		**Limites de Consistência**			**Teor em água**	**Tempo de secagem**	**Massa amostra inicial**
		AASTHO	UNIF.	L.L.	L.P.	I.P.	w	t	m
				(%)	(%)	(%)	(%)	(h)	(g)
A0544.22	Argila siltosa	A-4(8)	CL-ML	19	14	5	0,9	2,0	2287,1
A0791.22	Argila magra arenosa	A-6(9)	CL	40	19	21	3,8	4,0	883,6
A0796.22	Argila magra com areia	A-6(12)	CL	36	17	19	9,6	4,0	92,1
A0538.22	Argila silto-arenosa	A-4(3)	CL-ML	20	15	5	9,8	4,0	1728,5
A0797.22	Argila magra arenosa	A-6(10)	CL	37	17	20	11,1	4,0	242,2
A0792.22	Argila magra arenosa	A-6(7)	CL	31	17	14	16,0	4,0	215,2

A observação entre os dados obtidos pelos ensaios realizados em areias NP e as argilas, permitiu concluir que nos casos em que ambas apresentam massa e *w* idêntico, as amostras que necessitaram de mais tempo para secarem foram as amostras constituídas por material plástico, isto é, as argilas. A comparação entre A0602/22 e A0797/22, bem como A0605/22 e A0792/22 comprova tal afirmação na medida em que ambas detêm massas e *w* análogos entre si, tendo sido obtido o maior tempo de secagem nas amostras caracterizadas com a presença de material plásticos, ou seja, as argilas (A0797/22 e A0792/22), e com uma diferença mínima de 2 h. Esta asserção pode ir ainda mais longe, na medida em que se verificou que amostras onde os valores dos limites de consistência diferiam de zero, tendo massa idêntica e até mesmo *w* inferior, obtiveram um tempo de secagem mais elevado. Esta situação é visível entre A0600/22 - A0797/22, e ainda em A0955/22 - A0971/22, onde com uma diferença inferior a 100 g na massa ensaiada, foi possível verificar que as amostras de argila (A0797/22 A0971/22) e, com quase metade do *w* das de areia NP, mas com IP a rondar as duas dezenas, necessitaram do dobro do tempo em estufa.

Uma simples análise entre os resultados obtidos pelas areias LL com as argilas, permite constatar que estas últimas, por natureza, recorrem a tempos de secagem mais elevados. Pode-se também

verificar uma situação análogo à observada na comparação com as areias NP. Onde a amostra de argilosa com quantidades de material semelhante e com *w* menor teve de ser colocada em estufa por mais tempo, tendo ainda a particularidade de apresentar IP mais elevado. Isto foi visível entre A0716/22 e A0791/22, sendo que esta última corresponde a uma argila com aproximadamente metade do *w*, mas que demorou duas vezes mais a ficar completamente seca. Pressupõe que tal se sucedeu devido à diferença significativa no IP, que corresponde a 21 na argila (A0791/22) e 8 na areia LL (A0716/22). Uma outra situação que se verificou pela comparação entre estes dois tipos de solo foi que uma amostra de argila com cerca de metade do *w* e do IP (e massa idêntica - A0796/22) recorreu às mesmas 4 h mínimas que a de areia com plasticidade associada (A0798/22) para se apresentar completamente seca.

4.4. Proposta de tempos de secagem a aplicar consoante identificação do solo

O objetivo inicial era dar início à criação de uma tabela que propusesse tempos de secagem consoante a identificação inicial do solo sendo que, dentro de certas limitações, o estudo realizado permite fazer algumas recomendações.

Tendo em conta que todas as amostras de areia NP ensaiadas (11) necessitaram de 2 h em estufa e depois de se concluir que a massa ensaiada apresenta maior influência no tempo de secagem do que propriamente o *w*, sugere-se tomar-se como referência o Quadro 8, ou seja, aumentar o tempo de secagem quando a quantidade de material for maior, recomendando um intervalo mínimo de 2 h.

Visto que todas as amostras de areias LL com massa inferior a 1500 g e *w* inferior a 10 %, à semelhanças das areias NP, necessitaram de 2 h para secarem completamente, indica-se a mesma sugestão apresentada para esse tipo de solo, aconselhando o aumento deste tempo para 4 h quando o material superar os 1500 g. No caso de amostras com *w* compreendido entre 10 e 20 %, há maior heterogeneidade nos tempos de secagem obtidos, pelo que, apesar de haver a probabilidade de o material secar em 4 h, é necessário ter alguma sensibilidade para identificar material com maiores quantidades de finos e a probabilidade de um IP mais elevado pois, como já visto, este representa um papel importante no tempo de secagem. Se tal se verificar, propõe-se colocar o solo mais tempo em estufa (mínimo de 5 a 6 h).

Apesar de ser ambicioso, é possível fazer algumas recomendações relativamente aos tempos de secagem a aplicar em argilas. A análise feita até este ponto, permite afirmar que neste tipo de solo,

a quantidade de material ensaiado, assim como a de água presente nesta influencia diretamente o tempo em estufa. As amostras disponíveis apresentavam *w* compreendido entre 3,8 % e 16 % e massa entre cerca de 80 e 1700 g, tendo sido o tempo de secagem mínimo de 4 h. No entanto, apenas se indica a aplicação desse tempo quando o *w* for inferior a 10 % e o IP indiciar ser baixo, visto que nos restantes ensaios realizados o *w* rondava os 10 e 16 % e a massa envolvida era relativamente baixa (entre 90 e 250 g). Pelo que, em amostras de dimensões maiores, é aconselhado aumentar o tempo em estufa.

Quanto a amostras de cascalho não se pode tirar conclusões devido à escassez de amostragem, sendo, pela mesma razão, difícil propor um tempo de secagem mínimo para siltes. Todavia, pode sugerir-se a aplicação de medidas análogas às argilas.

O quadro seguinte reúne toda esta informação, devendo ser apenas considerada como uma proposta inicial de um estudo que deve ser continuado.

Quadro 17: Proposta de tempos de secagem a aplicar consoante identificação do solo.

Identificação do material	Massa da amostra(g)	Teor em água – w (%)	IP	Tempo de secagem mínimo recomendado (h)
Areias LL	<1500	<10	-	2
	>1500	10 ou mais	-	4
Areias LL	<1500	<10	-	2
	500 - 1500	10 - 20	-	4 a 6
	> 1500		elevado	6
Argilas	<1500	<10	Baixo	4
	90 - 250	10 - 16	<20	4
	>250	>10	Médio a elevado	6h

4.5. Teor em água obtido pelos métodos expeditos

Como referido anteriormente, para as amostras descritas no Quadro 6, foram realizados ensaios de acordo com o método do aquecimento direto (com recurso a uma placa de aquecimento), combustão de álcool e *speedy*. Para além dos resultados relativos ao teor em água, foram calculados os coeficientes de correlação (em valor absoluto) e possíveis fatores de correção de acordo com a identificação do material e método executado. Estes parâmetros foram determinados com base na Equações 4 e 5, respetivamente.

$$Coeficiente\ de\ correlação = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}}$$ Equação 4

Onde,

x - valores obtidos em estufa

$\bar{x}$ – média dos valores obtidos em estufa

y – valores obtidos pelo método expedito em análise

$\bar{y}$ – média dos valores obtidos pelo método expedito em análise

$$Fator\ de\ correção = \frac{w_{estufa}}{w_x}$$ Equação 5

Onde,

w_x – teor em água do método expedito em análise

Os valores relativos ao *w* obtido pelos diversos ensaios realizados em areias não plásticas encontram-se indicados no Quadro 18 e nas Figuras 17, 18, 19 e 20. A análise destes permite concluir que o método com resultados mais satisfatórios foi o do aquecimento direto, tendo com conta o nível de correlação entre os métodos e o método tradicional a ainda o fator de correção determinado que permite obter resultados muito próximo do *w* obtido em estufa em grande parte dos casos. Relativamente ao ensaio que recorre à combustão de álcool, os resultados foram os menos positivos, apesar da boa correlação com os valores esperados. Neste tipo de solos, os resultados indicam que uma queima é suficiente e permite chegar aos resultados mais fiáveis, no entanto, é notória a discrepância na amostra com *w* mais elevado (A0603/22). Os valores obtidos pelo método do *speedy* foram mais positivos que aqueles obtidos pela queima de álcool, sendo mesmo comparáveis aos obtidos pela placa de aquecimento.

Quadro 18: Teor em água obtidos em areias NP por aplicação de métodos expedidos.

Amostra	**Litologia**	**Teor em água - w**					
		Estufa	Placa de Aquecimento	Combustão de álcool			*Speedy*
				1ª Combustão	2ª Combustão	3ª Combustão	
A0541/22	Areia mal graduada com silte	5,1	5,0	5,6	5,7	6,1	5,5
A0680/22	Areia siltosa com cascalho	9,7	9,6	11,3	11,9	12,6	9,2
A0603/22	Areia siltosa	16,9	16,8	18,9	18,8	18,9	15,7
Coeficiente de correlação			1,000	0,999	0,995	0,991	1,000
Fator de correção			1,007	0,886	0,867	0,829	1,015

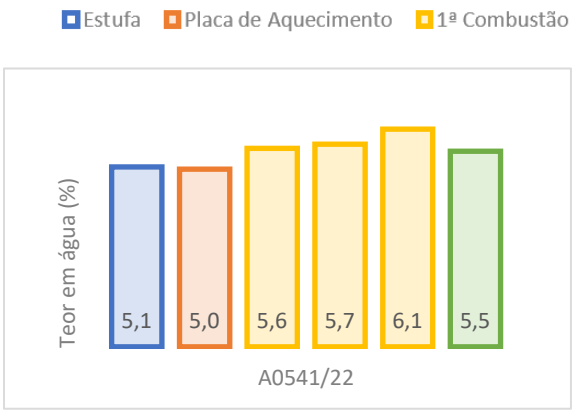


Figura 19: Gráfico representativo do *w* obtido pelos métodos expeditos em A0541/22 (areia NP).

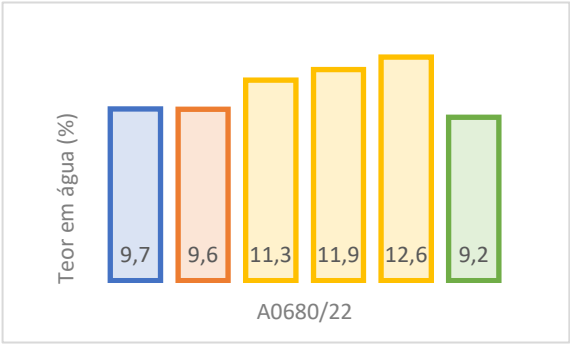


Figura 18: Gráfico representativo do *w* obtido pelos métodos expeditos em A0860/22 (areia NP).

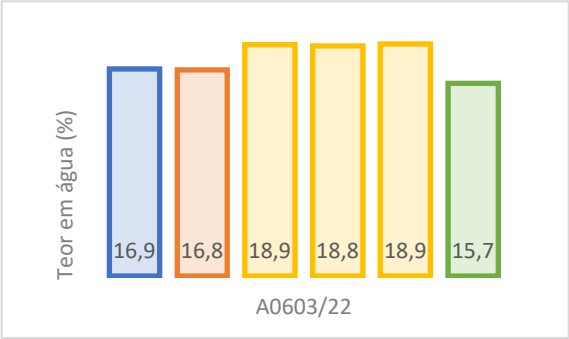


Figura 19: Gráfico representativo do *w* obtido pelos métodos expeditos em A0603/22 (areia NP).

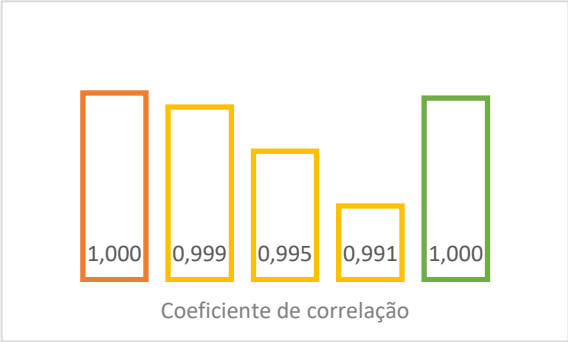


Figura 2019: Gráfico representativo do coeficiente de correlação dos métodos expeditos realizados em areias NP.

Os mesmos procedimentos foram realizados para areias com plasticidade e os resultados estão explícitos no Quadro 19 e nas Figuras 21, 22, 23 e 24. À semelhança do que se verificou nas areias NP, em todos os resultados a correlação é bastante positiva, no entanto é um pouco atrevido dizer que se determinou um fator de correção com a mesma coerência, visto que a multiplicação deste pelo método em questão não permitiu alcançar o *w* obtido em estufa, na maior parte das amostras e diferentes métodos. O método utilizado com recurso à placa de aquecimento é, de novo, aquele que reproduziu melhor resultados e com coeficiente de correlação máximo. Quanto ao método do álcool, identicamente ao que se apurou nas areias NP, uma queima também seria não só o suficiente como também o aconselhado, visto que se verificou projeção de partículas para fora do recipiente, assim como pequenas explosões, que poderão ser a causa de valores mais afastado do esperado, sendo esta dispersão mais acentuada em amostras com *w* baixo (A0543/22) e alto (A0798/22). As conclusões retiradas para o método do *speedy* são semelhantes às referidas para a combustão do álcool, na medida em que também se verificou uma dispersão significativa nas amostras onde o *w* era baixo e elevado, tendo mesmo sido os resultados obtidos pela aplicação deste método os menos satisfatórios neste tipo de solo.

Quadro 19: Teor em água obtidos em areias LL por aplicação de métodos expedidos.

Amostra	Litologia	Teor em água – w					
		Estufa	Placa de Aquecimento	Combustão de álcool			*Speedy*
				1ª Combustão	2ª Combustão	3ª Combustão	
A0543/22	Areia argilosa com cascalho	0,6	0,7	1,1	1,3	1,4	1,2
A0771/22	Areia siltosa com cascalho	9,5	9,3	10,6	11,1	11,3	9,2
A0798/22	Areia argilosa	20,4	19,2	23,5	26,5	25,4	24,4
Coeficiente de correlação			1,000	1,000	0,998	0,999	0,993
Fator de correção			0,965	0,764	0,687	0,679	0,781

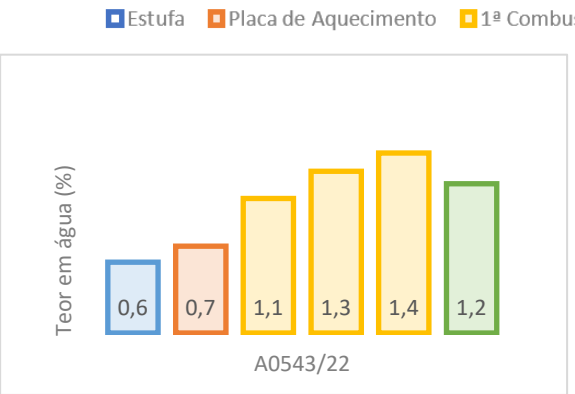


Figura 21: Gráfico representativo do *w* obtido pelos métodos expeditos em A0543/22 (areia LL).

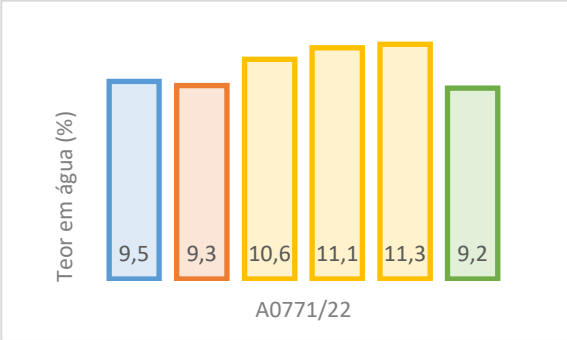


Figura 22: Gráfico representativo do *w* obtido pelos métodos expeditos em A0771/22 (areia LL).

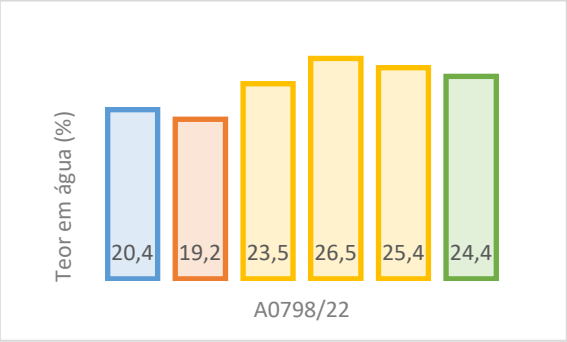


Figura 23: Gráfico representativo do *w* obtido pelos métodos expeditos em A0798/22 (areia LL).

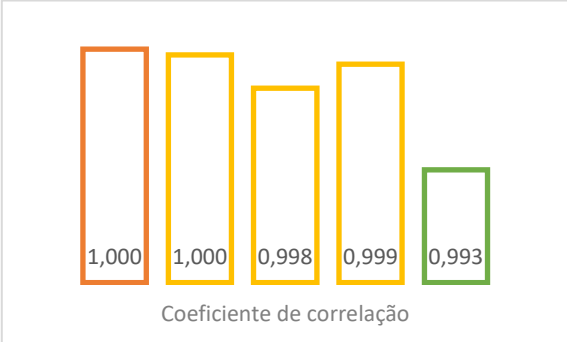


Figura 24: Gráfico representativo do coeficiente de correlação dos métodos expeditos realizados em areias LL.

Foram ainda realizados os diversos ensaios nas duas amostras de siltes disponíveis, e os valores determinados encontram-se no Quadro 20 e nas Figuras 25 e 26. Tendo a amostragem ter sido menor neste tipo de material, o coeficiente de correlação apresentado é meramente indicativo, no entanto, os resultados obtidos forneceram informações um pouco distintas das até então obtidas, nomeadamente no método da combustão do álcool pois, ao contrário do que se tinha verificado,

uma das amostras (A0795/22) não apresentou resultados fiáveis na primeira combustão, mas sim à segunda. O oposto se verificou na outra amostra de solo ensaiada, onde, não só a primeira combustão obteve resultados mais fiáveis, como os valores obtidos pela segunda foram muito dispares. Tal acontecimento pode estar relacionado com a projeção de partículas para fora do recipiente e com as pequenas explosões verificadas. De forma análoga ao mencionado nas amostras de areia LL, o método do *speedy*, também nesta amostra, se mostrou um pouco distante dos outros resultados, obtendo valores de *w* acima do esperado, sobretudo na amostra A0795/22. O método de aquecimento direto, que tinha vindo a ser aquele com resultados mais fidedignos, apresenta maiores disparidades nesta tipologia de solo. Este estudo pode indicar que os métodos não são muito viáveis em amostras com *w* elevado.

Quadro 20: Teor em água obtidos em siltes por aplicação de métodos expedidos.

Amostra	**Litologia**	**Teor em água – w**					
		Estufa	Placa de Aquecimento	Combustão de álcool			*Speedy*
				1ª Combustão	2ª Combustão	3ª Combustão	
A0795/22	Silte arenoso	32,0	34,0	15,0	33,7	34,1	36,6
A0597/22	Silte elástico arenoso	33,7	32,3	32,9	36,2	36,1	34,8
Coeficiente de correlação			1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Fator de correção			0,992	1,578	0,940	0,936	0,921

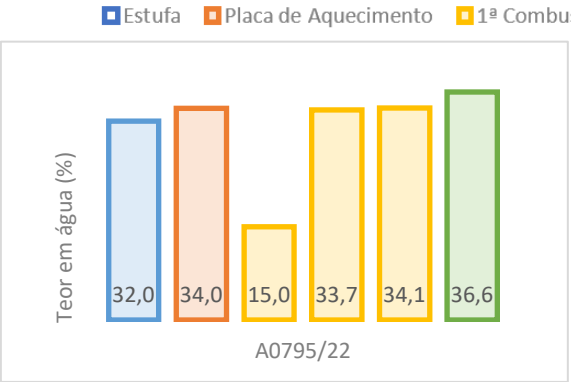


Figura 25: Gráfico representativo do *w* obtido pelos métodos expeditos em A0795/22 (silte).

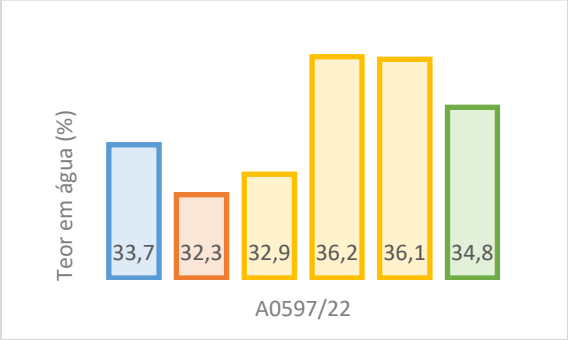


Figura 26: Gráfico representativo do *w* obtido pelos métodos expeditos em A0597/22 (silte).

Relativamente às argilas, os resultados obtidos são apresentados no Quadro 21 e nas Figuras 27, 28, 29 e 30. Grande parte das conclusões retiradas da análise feita aos outros tipos de solo, se aplicam a este. Nomeadamente o facto de, mais uma vez, o método do aquecimento direto ter sido

aquele onde os resultados foram mais satisfatórios, apesar de ter sido numa das amostras de argila (A0791/22) onde este método mostrou um dos seus resultados menos positivos. Relativamente ao método da combustão do álcool os resultados mais próximos dos obtidos em estufa foram, maioritariamente, os da 1ª queima, com exceção da amostra com maior *w* (A0792/22), tendo todos os resultados obtidos sido mais elevados do que os induzidos nos provetes. Analogamente ao que se observou nos outros solos, o método do *speedy* obteve os resultados mais distantes dos esperados e sempre superiores, mesmo após repetições sucessivas. A acrescentar, também neste material, não foi possível obter um fator de correlação fidedigno, muito possivelmente devido ao número reduzido de amostras em estudo.

Quadro 21: Teor em água obtidos em argilas por aplicação de métodos expedidos.

Amostra	**Litologia**	**Teor em água – w**					
		Estufa	Placa de Aquecimento	Combustão de álcool			*Speedy*
				1ª Combustão	2ª Combustão	3ª Combustão	
A0544/22	Argila siltosa	0,9	1,1	1,8	2,0	2,5	1,2
A0791/22	Argila magra arenosa	3,8	4,7	4,6	4,9	4,7	6,6
A0792/22	Argila magra arenosa	16,0	16,5	18,4	18,5	18,0	18,8
Coeficiente de correlação			0,999	1,000	1,000	0,999	0,992
Fator de correção			0,875	0,737	0,701	0,691	0,733

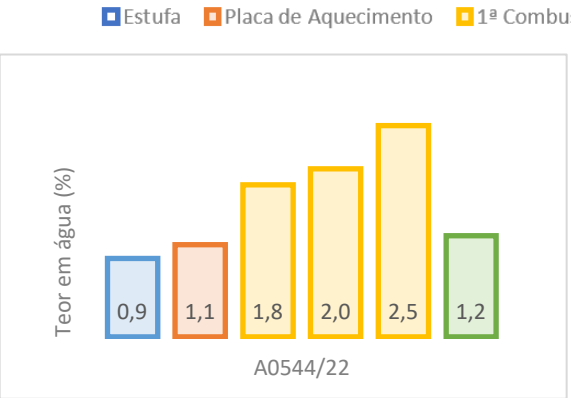


Figura 27: Gráfico representativo do *w* obtido pelos métodos expeditos em A0544/22 (argila).

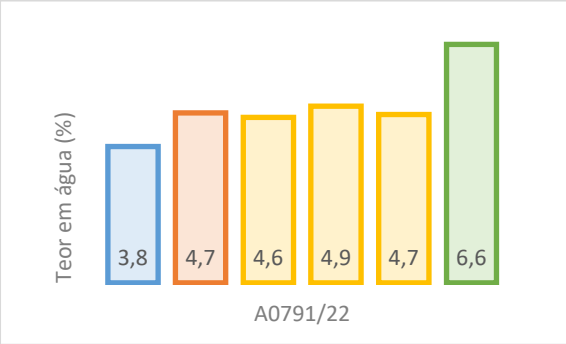


Figura 28: Gráfico representativo do *w* obtido pelos métodos expeditos em A0791/22 (argila).

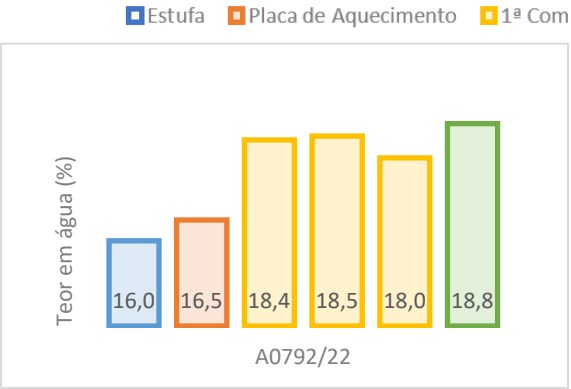


Figura 29: Gráfico representativo do *w* obtido pelos métodos expeditos em A0792/22 (argila).

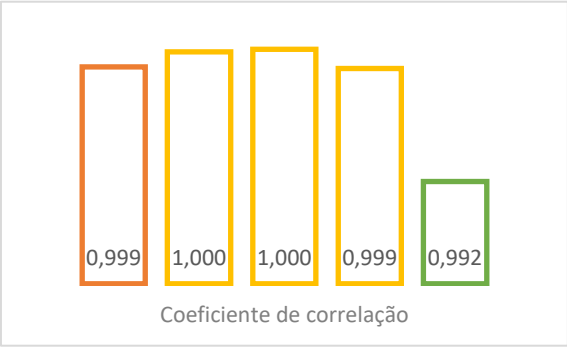


Figura 30: Gráfico representativo do coeficiente de correlação dos métodos expeditos realizados em argilas.

Tendo em consideração todos os resultados obtidos, e com o intuito de os refinar e possivelmente entrar com um fator de correção mais coerente, tomou-se a iniciativa de realizar mais ensaios pelos diversos métodos, focando-se num único tipo de solo: areias com plasticidade associada, sobretudo pela diversidade de amostras disponíveis aquando da realização dos testes. Assim, foram realizados ensaios em mais 6 amostras de areia LL, perfazendo um total de 9. Os resultados obtidos nas novas experiências encontram-se resumidos no

Quadro 22.

No que diz respeito ao método do aquecimento direto, conclui-se que a correlação, que já existia com apenas 3 amostras, se manteve, mas foi possível perceber que o aumento no número de ensaios permitiu determinar um fator de correlação que atribuiu resultados mais próximos dos obtidos em estufa, com exceção de amostras com *w* elevado (A0798/22, A0793/22 e A0794/22). Este continuou a ser o procedimento com resultados mais fiáveis, apesar de terem sido detetadas algumas discrepâncias em amostras cujo *w* é mais elevado.

Relativamente aos valores obtidos pelo método da combustão do álcool, apesar de a 2ª queima apresentar um coeficiente de correlação ligeiramente mais elevado, os resultados da primeira encontram-se mais próximos dos esperados. No entanto, são visíveis discrepâncias significativas quando o *w* é baixo ou elevado, como é o caso de A0543/22, A0542/22 e A0545/22, e A0798/22, A0798/22 e A0794/22, respetivamente. O aumento da amostragem possibilitou a determinação de um melhorar o fator de correção, mas não o suficiente visto que grande parte dos valores obtidos pela aplicação deste diferiam bastante dos esperados.

Quanto aos resultados obtidos pelo *speedy*, verificaram-se as mesmas limitações anteriormente referidas, visto que na grande parte dos casos o *w* obtido foi maior que o esperado (com exceção de A0771/22), chegando-se a obter resultados que corresponderam ao dobro do esperado, como

na A0543/22 (*w* muito baixo) e valores superiores em 4 % em amostras cujo *w* era elevado (A0794/22).

Finalmente, a realização do estudo com um número maior de ensaios proporcionou um melhoramento não só no coeficiente de correlação, como também um ajuste fator de correção, permitindo alguns valores mais próximos dos valores da secagem em estufa, havendo ainda alguma discrepância em diversas amostras (por exemplo, A0543/22 e A0771/22).

Quadro 22: Teor em água obtidos em 9 amostras de areia LL por aplicação de métodos expedidos.

Amostra	**Litologia**	**Teor em água – w**					
		Estufa	Placa de Aquecimento	Combustão de álcool			*Speedy*
				1ª Combustão	2ª Combustão	3ª Combustão	
A0543/22	Areia argilosa com cascalho	0,6	0,7	1,1	1,3	1,4	1,2
A0542/22	Areia argilo-siltosa	0,7	0,7	1,5	2,1	2,4	1,0
A0545/22	Areia argilosa	1,0	0,9	1,9	2,0	5,8	1,3
A0539/22	Areia argilosa	5,8	6,3	5,7	6,4	6,6	6,4
A0540/22	Areia argilosa	6,5	6,7	6,9	7,2	7,4	7,1
A0771/22	Areia siltosa com cascalho	9,5	9,3	10,6	11,1	11,3	9,2
A0798/22	Areia argilosa	20,4	19,2	23,5	26,5	25,4	24,4
A079322	Areia siltosa	23,4	26,8	20,9	32,7	33,8	26,9
A0794.22	Areia siltosa	24,7	25,8	25,1	34,1	34,6	28,9
Coeficiente de correlação			0,994	0,989	0,996	0,987	0,998
Fator de correção			0,970	0,817	0,682	0,629	0,818

4.6. Análise crítica do teor em água obtido pelos métodos expeditos

Após especificação dos resultados obtidos em função da tipologia do material ensaiado, pretende-se neste ponto reunir todas as conclusões relativas aos métodos expeditos aplicados, estando todos os valores obtidos pelos estes discriminados no Quadro 23.

Os valores obtidos pelo método de aquecimento direto com recurso à placa de aquecimento corresponderam, de um modo geral, ao procedimento com melhores resultados em todos os tipos de solo, tendo apresentado as maiores discrepâncias nos siltes ensaiados. No entanto, não se pode afirmar que neste tipo de materiais, este não é um método válido uma vez que todas as amostras de silte disponível (apenas 2) apresentavam teores em água elevados e as falhas verificadas ao longo do estudo surgiram em provetes com essa característica. Apesar disso, a investigação levada

a cabo vai de encontro à realizada por Berney, Kyzar e Olyelam (2011) na medida em que ambas caracterizam este método como sendo aquele com melhor desempenho, devendo ser considerada a principal técnica em substituição ao método da secagem em estufa, quando não estão reunidas as condições para a aplicação do mesmo.

No que diz respeito aos resultados obtidos no método de combustão do álcool, é possível afirmar que os coeficientes de correlação determinados vão de encontro aos indicados noutros estudos já mencionados no ponto 2.3.3, que indicam uma boa correlação, próxima de 1. Tendo também sido identificados alguns episódios que, não só levantam questões de segurança, como a fiabilidade dos resultados, nomeadamente a formação de bolhas e, consequentemente, a ocorrência de pequenas explosões tal como referido por Braga et al. (2017). Os autores indicam como possibilidade para tal situação a presença de matéria orgânica e/ou gases nas amostras e acredita-se que, no estudo apresentado neste documento, tal situação, associada também à projeção de partículas para fora do recipiente de ensaio, tenha levado a que os valores da primeira queima tinham sido, maioritariamente, os mais baixos e os mais próximos dos obtidos em estufa, contrariamente ao que é sugerido por Liang e Hu (2020), que indicavam que a realização de três combustões era o mais adequado e que permitia obter os melhores resultados. Acrescenta-se ainda que as amostras com *w* baixo ou elevado os resultados apresentaram os resultados menos positivos. Esta afirmação é transversal a todos os tipos de solos estudados e, por isso mesmo, não é razoável dizer que este método apresenta a mesma validade que, por exemplo, o de aquecimento direto como sugerem Schreiner e Rodrigues (2018) no estudo que realizaram em areias.

Quanto ao método do *speedy*, pode afirmar-se com segurança que os resultados mais satisfatórios foram obtidos em areias NP e, tal afirmação, vai de encontro ao mencionado por Lucas et al. (2019) que indica não ter obtido resultados tão positivos em solos com maiores percentagens de argila, indicando ainda que a precisão do método diminui com o aumento da quantidade de água presente. Todavia, contrariamente ao conjunto de valores obtidos por estes autores que, de um modo geral, eram mais baixos do que aqueles obtidos em estufa, os resultados apresentados neste documento foram, à semelhança dos de Braga et al. (2011), maioritariamente, sobrestimados, sobretudo em provetes com teores em água baixos ou elevados. Relativamente à menor fiabilidade associada a amostras com *w* baixo, acredita-se que possa estar associada à dificuldade em distribuir uniformemente a quantidade de água adicionada à amostra para que ela retribua o mesmo valor de *w* que foi obtido inicialmente em estufa, visto que todos os teores em água obtidos pelos métodos expeditos foram induzidos. O facto de a homogeneização ser difícil de atingir e da quantidade de material que efetivamente vai ser seca ser reduzida, e estipulada pela balança fornecida, podem ser justificação para estes resultados. Os autores apresentam ainda mais duas

justificações para a discrepância, nomeadamente: o tamanho reduzido das amostras de solo de materiais mais grosseiros, uma vez que nestes casos é necessário eliminar o material que fica retido no peneiro nº 4, sobrando, desta forma, a fração mais fina onde a retenção da água disponível é maior (tendo esta situação ter sido verificada, por exemplo, em A0541/22 e A0792/22); e ainda o facto de, quer em solos com *w* baixo, como alto, estar associado o cálculo da multiplicação de valores associados à conversão dos respetivos teores em água que acabam por introduzir um erro geral na estimativa do valor final. Posto isto, concorda-se com a afirmação feita pelos autores que apenas recomendam a utilização deste método em último recurso, e que, à semelhança do sugerido por Santos (2008), este procedimento deve ser limitado a solos granulares.

A título de conclusão, os resultados indicam que, a fiabilidade dos valores obtidos diminui com o aumento do material plástico na amostra. Apresenta-se, em seguida um resumo das vantagens e inconvenientes associados a cada método (Quadro 24).

Quadro 23: Resumo de todos os resultados de w obtidos pelos métodos expeditos.

	Amostra	**Litologia**	**Teor em água – w**					
			Estufa	Placa de Aquecimento	Combustão de álcool			*Speedy*
					1ª Combustão	2ª Combustão	3ª Combustão	
Areia NP	A0541/22	Areia mal graduada com silte	5,1	5,0	5,6	5,7	6,1	5,5
	A0680/22	Areia siltosa com cascalho	9,7	9,6	11,3	11,9	12,6	9,2
	A0603/22	Areia siltosa	16,9	16,8	18,9	18,8	18,9	15,7
Areia LL	A0543/22	Areia argilosa com cascalho	0,6	0,7	1,1	1,3	1,4	1,2
	A0542.22	Areia argilo-siltosa	0,7	0,7	1,5	2,1	2,4	1,0
	A0545.22	Areia argilosa	1,0	0,9	1,9	2,0	5,8	1,3
	A0539.22	Areia argilosa	5,8	6,3	5,7	6,4	6,6	6,4
	A0540.22	Areia argilosa	6,5	6,7	6,9	7,2	7,4	7,1
	A0771/22	Areia siltosa com cascalho	9,5	9,3	10,6	11,1	11,3	9,2
	A0798/22	Areia argilosa	20,4	19,2	23,5	26,5	25,4	24,4
	A0793.22	Aria siltosa	23,4	26,8	20,9	32,7	33,8	26,9
	A0794.22	Areia siltosa	24,7	25,8	25,1	34,1	34,6	28,9
Silte	A0795/22	Silte arenoso	32,0	34,0	15,0	33,7	34,1	36,6
	A0597/22	Silte elástico arenoso	33,7	32,3	32,9	36,2	36,1	34,8
Argila	A0544/22	Argila siltosa	0,9	1,1	1,8	2,0	2,5	1,2
	A0791/22	Argila magra arenosa	3,8	4,7	4,6	4,9	4,7	6,6

A0792/22	Argila magra arenosa	16,0	16,5	18,4	18,5	18,0	18,8

Quadro 24: Vantagens e inconvenientes associados aos métodos de obtenção do teor em água aplicados nesta investigação.

	Vantagens	Inconvenientes
Método gravimétrico (secagem em estufa)	– É o método padrão, utilizado para calibrar todos os restantes métodos disponíveis; – Custo baixo a médio; – Permite a determinação do *w* de várias amostras em simultâneo; e – Possibilita o aquecimento/secagem uniforme por toda a amostra.	– Não pode ser realizado em campo uma vez que a estufa é um equipamento de laboratório; e – Recorre a uma quantidade de tempo elevada para obter resultados.
Método do aquecimento direto (placa de aquecimento)	– Baixo custo; – Recorre a material simples e prático de manusear; – Os instrumentos utlizados são pequenos e portáteis; – Pode ser realizado em campo; e – Permite obter resultados num curto período de tempo.	– Apenas é possível secar uma amostras de cada vez; – Há a possibilidade de sobreaquecimento se não se mexer o material cuidadosamente; e – Requer constante atenção por parte do operador, por isso, apesar de permitir obter resultados rápido, impossibilita o técnico de realizar outras tarefas.
Método da combustão do álcool	– Baixo custo; – Recorre a material simples e prático de manusear; – Os instrumentos utlizados são pequenos e portáteis; – Pode ser realizado em campo; e – Permite obter resultados num curto período de tempo.	– Apenas é possível secar uma amostras de cada vez; – O material secado por este método fica destruído; – Pode haver destruição da matéria orgânica presente na amostra, induzindo os resultados em erro; – Requer constante atenção por parte do operador, sobretudo por questões de segurança; – A dosagem do álcool pode influenciar os valores obtidos; e – Não é recomendada a aplicação em: solos constituídos por elevadas quantidades halloysita, mica, montmorilonite, gesso e ainda solos onde a água localizada nos poros possa conter sólidos dissolvidos, em amostras elevada percentagem de matéria orgânica inflamável ou com contaminantes.
Método do *speedy*	– Pode ser realizado em campo; – Os instrumentos utlizados são pequenos e portáteis; e – Permite obter resultados num curto período de tempo.	– Apenas é possível secar uma amostras de cada vez; – O material secado por este método fica destruído; – Necessita de curvas de calibração; – Recorre a reagentes químicos; e – Existe uma série de fatores que pode influenciar os resultados durante o procedimento, nomeadamente: fechar corretamente o equipamento e a realização dos movimentos como são descritos no procedimento de modo a fragmentar o material e possibilitar o contacto completo entre o reagente e as partículas; e presumir que todo o hidrogénio que reage é proveniente das moléculas de água.

Capítulo V

Considerações finais

5. Considerações finais

5.1. Conclusões

A realização de cerca de 230 ensaios que compõe este estudo permitiram reforçar a importância que a quantidade de água presente num solo, assim como a sua quantificação, tem na engenharia e como é vasto o conjunto de métodos disponíveis para a sua obtenção.

Não só a bibliografia consultada, como todo o conjunto de ensaios realizados ao longo do desenvolvimento deste estudo, foram determinantes para confirmar que o teor em água não tem a mesma influência em todos os materiais, sendo uma característica de especial importância no comportamento de materiais argilosos.

É possível afirmar que os objetivos iniciais, dentro de certas limitações, foram alcançados, e as hipóteses iniciais verificadas: foi demonstrado experimentalmente que amostras com maiores quantidades de material efetivamente requerem um maior tempo de secagem em estufa, quer se trate de materiais arenosos, quer argilosos; tomou-se consciência de que a quantidade de água presente tem maior influência nos tempo de secagem de argilas do que de areias; confirmou-se que materiais argilosos necessitam, inevitavelmente, mais tempo em estufa para secarem completamente; e foram visíveis os efeitos da percentagem de finos e do índice de plasticidade no tempo de secagem de diversos solos.

O estudo prático de outros métodos de obtenção do teor em água foi útil não só para reforçar a eficiência e importância do método utilizado como padrão, como permitiu aferir, de entre os que foram estudados, qual o poderia substituir na impossibilidade da sua aplicação (e caso não sejam necessários resultados tão precisos), como por exemplo, em análises realizadas em campo.

O método da combustão de álcool apresentou coeficientes de correlação com o método de secagem em estufa positivos, no entanto, levantou algumas questões, nomeadamente: de segurança, devido à projeção de partículas e de pequenas explosões visualizadas; e não possibilitou a obtenção de resultados fiáveis em amostras com *w* baixo e elevado. Relativamente a este procedimento, acrescenta-se que, de um modo geral, os resultados mais próximos dos esperados foram obtidos na 1ª combustão realizada.

No método do *speedy*, apesar de ter apresentado resultados satisfatórios nas areias não plásticas, os restantes valores obtidos foram, maioritariamente, superiores aos esperados e a obtenção de teores em água muito baixos e elevados foi particularmente desafiante, tendo sido necessário recorrer a várias repetições (que muitas das vezes não possibilitaram melhorar os resultados

atingidos). Posto isto, concluiu-se que a aplicação desta técnica deve limitar-se a solos granulares e apenas em último recurso.

Por fim, o método de aquecimento direto foi o que, globalmente, obteve melhores resultados, isto é, mais próximos dos determinados em estufa. Apesar de terem surgidos algumas, mas pequenas, discrepâncias, sobretudo, em amostras com *w* elevado, este procedimento foi nitidamente superior aos restantes e, portanto, na eventualidade de se necessitar de substituir o método padrão, acredita-se que se possa optar por este método.

5.2. Limitações e Perspetivas futuras

O presente estudo apresentado esteve, naturalmente, sujeito a certas limitações. Visto que a amostragem não foi realizada pelo LABC da MEEC, mas sim pelos clientes que recorrem aos serviços da empresa. Não só é necessário assumir que a recolha das amostras é feita corretamente, como também apenas é possível trabalhar com o material disponibilizado. Esta questão foi várias vezes um entrave à realização de certos procedimentos e ao aumento do número de ensaios realizados.

Inevitavelmente o número de amostras ensaiadas é fundamental numa investigação como a presente, e apesar do número elevado de amostras ensaiadas num curto período de tempo, é fundamental a realização de um número mais alargado de ensaios, sobretudo em amostras com menos destaque neste estudo, nomeadamente siltes e cascalhos. Tendo em conta a influência do teor em água em amostras de argila, para além de sugerir a realização de mais ensaios, seria interessante perceber o comportamento do material de acordo com o tipo de argila em questão. Assim, sugere-se que sejam realizados ensaios de difração de raios-X.

Deve ainda ter-se em consideração que grande parte dos teores em água foram induzidos nas amostras, isto é, foi determinada a quantidade necessária de água a adicionar ao solo para que este apresentasse o *w* natural obtido quando chegou ao laboratório, o que naturalmente pode introduzir erros gerais nos resultados, quer pelo cálculo errado desta quantidade, quer pela falta de precisão com que se determinam massas ou se adiciona água, quer pela forma mais ou menos uniforme com que se homogeneíza a amostras, entre outros.

Posto isto, em estudos futuros, sugere-se a realização da determinação do teor em água e, consequentemente, o tempo de secagem de um maior número de amostras. Se possível, recomenda-se que a recolha destas seja feita pelo autor do projeto pois, não só saberá como esta foi realizada e as condições climatéricas existente no momento da recolha, como poderá recolher uma quantidade de material adequada à investigação que pretende realizar. Acredita-se que seja

positivo reduzir o intervalo entre pesagens de modo a aumentar a precisão com que se determina o tempo de secagem, visto que se observou que várias amostras se encontravam com teores em água inferiores a 0,5 % quando se efetuou a penúltima pesagem.

No que diz respeito a investigações a outros métodos que não o padrão, sugere-se que os ensaios de comparação sejam realizados no mesmo momento que os da secagem em estufa para que, deste modo, não seja necessário introduzir a quantidade de água necessário para o igualar. Para além da testagem com outros métodos de obtenção do teor em água como, por exemplo, o do micro-ondas que não só é de simples aplicação, como também recorre a instrumentos simples, práticos, portáteis e relativamente comuns; propõe-se que se verifique se a aplicação destes diversos métodos não afeta algumas características importantes dos solos, nomeadamente, os limites de consistência quando estes existem.

Capítulo VI

Referências bibliográficas

6. Referências Bibliográficas

ASTM - American Society for Testing and Materials, 2000. Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Direct Heating, D4959-00. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 39 pp.

ASTM - American Society for Testing and Materials, 2000. Standard Test Method for Field Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Microwave Oven Heating, D4643-00. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 5 pp.

ASTM - American Society for Testing and Materials, 2004. Standard Test Method for Field Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Calcium Carbide Gas Pressure Tester, D4959-00. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 5 pp.

Barbosa J.A., Almeida Rodrigues T.W., Montalvão M.L., Mont'Alvão W.V., Santos C.A.S., Santos A.F.S., Araújo C.R.R., 2018. Determinação do Conteúdo de Água no Solo pelo Método do Álcool. FEPEG Forum - 12 Ciência e Tecnologias: Implicações no ensino, pesquisa e extensão.

Berney IV E.S., Kyzar J.D., Oyelami L.O., 2011. Device comparison for determining field soil moisture content. Geotechnical and Structures Laboratory, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg. 63 p.

Bhatt S., Jain P.K., 2014. Correlation between electrical resistivity and water content of sand: a statistical approach. American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics 6(2):115-121.

Brito A.M.A.C., 2006. Compactação de Aterros de Barragens. Novas Metodologias de Controlo. Universidade Técnica de Lisboa. 233 p. (Dissertação de Mestrado).

Burgers A., Yoder E.J., 1962. Nuclear moisture: density measurements in construction control. Purdue university.

Campbell C.S., 2014. Water Content measurement theory and application. Decagon Devices Soil Moisture 201. (Seminário).

Chowdhury M.A., 2014. Determination of water content of soil sample by different methods. Northeast Students Geo-Congress on Advances in Geotechnical Engineering.

Civil Wale, 2020. How to determine the Water Content of Soil? (7 Methods). In: https://civilwale.com/how-to-determine-the-water-content-of-soil/#Pycnometer_method (consultado em 30 de Agosto de 2022).

Cordeiro C.S.A., 2018. Avaliação da qualidade de amostragem de solos suscetíveis à liquefação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 141 p. (Dissertação de Mestrado).

Daoud H., 2012. Determination of Moisture Content and Liquid Limit of Foundations Soils, using Microwave Radiation, in the Different Locations of Suleimani Governorate, Kurdistan Region-Iraq. Conference: World Academy of Science, Engineering and Technology, 66:1171-1177.

Faria L.F.D., Gomes R.M.S., Sarmento A.P., Camargo D., Fernandes I., 2017. Correlação dos teores de umidade obtidos através de diferentes métodos de ensaio. 3ºCOMPEEX - Congresso de Pesquisa, Ensino, Extensão e Cultura: 509-513. (Conference Paper).

G3SoilWorks, 2021. Why is the moisture content of soil important in construction. In : https://g3soilworks.com/2021/04/28/why-is-the-moisture-content-of-soil-important-in-construction/ (consultado em 8 de Setembro de 2022).

Haque M.F., 2001. Classification Tests. In: Standard Test Procedures, Government of the People's Republic of Bangladesh Ministry of Communications Roads and Highways Department.

IPQ - Instituto Português da Qualidade, 1965. Solos. Determinação do teor em água, NP-84. Norma Portuguesa Definitiva.

IPQ - Instituto Português da Qualidade, 1969. Solos. Determinação dos limites de consistência, NP-143. Norma Portuguesa Definitiva.

Jalilian J., Moghaddam S.S., Tagizadeh Y., 2017. Accelerating Soil Moisture Determination with Microwave Oven. Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 48 (2): 101-103.

Jastrzebska M., 2019. Practical application of the microwave oven in the geotechnical laboratory. Architecture Civil Environment, 2:91-104.

Kailasha Foundation, 2018. Water Content Determination of Soil. In: https://kailashafoundation.org/2018/08/14/water-content-determination-of-soil/ (consultado em 14 de Agosto de 2022).

Kamai, T., Kluitenberg, G.J., Hopmans J.W., 2015. A dual-probe heat-pulse sensor with rigid probes for improved soil water content measurement. Soil Science Society of America Journal. 14 p.

Kramarenko V.V., Nikitenkov A.N., Matveenko I.A., Molokov V.Y., Vasilenko Y.S., 2016. Determination of water content in clay and organic soil using microwave oven. IOP Conference Series: Earth Environmental Science 43: 012029.

Liang X., Hu F., 2020. Discussion on the application of alcohol combustion method in the determination of soil moisture content. IOP Conference Series: Earth Environmental Science 525: 012093.

Lima C., Menezes J.E., 2008. Prospeção mecânica. In: Textos de apoio de Geologia de Engenharia. FEUP.

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1966. Solos. Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação, E195.

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1970. Classificação de solos para fins rodoviários, E240.

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1971. Solos. Análise granulométrica por peneiração húmida, E 239-1970.

Matos Fernades M., 1994. Mecânica dos Solos. Volume 1. FEUP. Porto.

Matos Fernandes, M., 2017. Mecânica dos solos: conceitos e princípios fundamentais. Volume 1, 5ª edição estendida aos solos não saturados, U.Porto Press, Porto.

Maurya R., 2022. Water Content Determination of Soil By Alcohol Method. In: http://civilarcho.com/alcohol-method-water-content-determination-of-soil/ (consultado em 7 de Julho de 2022).

Meter Group, 2020. Soil moisture sensors - How they work. Why some are not research-grade. In: https://www.metergroup.com/en/meter-environment/measurement-insights/tdr-fdr-capacitance-compared (consultado em 2 de Setembro de 2022).

The Constructor, 2019. Determination of Water Content by Sand Bath Method. In: https://theconstructor.org/geotechnical/determination-water-content-sand-bath-method/35181/ (consultado em 29 08 2022).

The Constructor, 2019. Determination of Water Content of Soil by Torsion Balance Method. In: https://theconstructor.org/geotechnical/determination-water-content-soil-torsion-balance-method/34965/ (consultado em 29 08 2022).

Neto A.L., António de Almeida J., 2013. Caracterização morfológica e química de Argissolos com horizontes subsuperfi ciais escurecidos em Santa Catarina. Revista de Ciências Agroveterinárias, 12 (2):294-303.

Nogueira J.B., 1977. Amostragem e reconhecimento do sub-solo. Universidade de São Paulo. 85 p.

Norberto, A. D. S., 2017. Avaliação da qualidade de amostras indeformadas de solos moles e correção da tensão de pré-adensamento. Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Caruaru.

Nunes M.S., 2014. Comparação de métodos via solo e via demanda evaporativa para manejo de irrigação. Universidade Federal de Santa Maria. 102 p. (Tese de Doutoramento).

Oliveira Lucas F.R., 2019. Validação do Método Speedy para determinação da umidade de diferentes tipos de solos. Universidade Federal Rural do Smeinário (UFERSA). 9 p. (Trabalho de conclusão de Curso).

Passos Braga G.V.B., Ribeiro M.J.S., Ferreira P.M.M., Guimarães R.O., Lopes dos Santos T., Viana M.F., 2017. Comparação de métodos de determinação do teor em umidade. Universidade Estatual de Goiás. 8 p.

Ramos C., Molina-Gómez F., Ferreira C., Viana da Fonseca A., 2021. Qualidade de amostras "indeformadas" em solos não coesivos recolhidas com procedimentos avançados. Geotecnia, Revista SPG, 153: 41-62.

Rasti A, Pineda M, Razavi M, 2020. Assessment of Soil Moisture Content Measurement Methods: Conventional Laboratory Oven versus Halogen Moisture Analyzer. J Soil Water Sci 4(1):151-160.

Ribeiro K.M., Castro M.H.C., Ribeiro K.D., Lima P.L.T., Abreu L.H.P., Barros K.L.C., 2018. Estudo comparativo do método padrão da estufa e do método speedy na determinação do teor em água no solo. Brazilian Journal of Biosystems Engineering 12(1): 18-28.

Ribeiro S.P.T., 2008. Terraplagem. Metodologia e técnicas de compactação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 121 p. (Dissertação de Mestrado).

Santos J.A., 2008. Compactação: Elementos Teóricos. Instituto Superior Técnico. 18 p.

Shreiner M.R., Rodrigues D.E., 2018. Comparativo entre os métodos de obtenção do teor de umidade utilizados nos serviços de compatação de solos. Faculdade Doctum de Caratinga, Brasil. 40 p. (Trabalho de conclusão de Bacharelado)

Souza Norberto A., 2017. Avaliação da qualidade de amostras indeformadas de solos moles e correção da tensão de pré-adensamento. Universidade Federal de Pernambuco. 80 p. (Monografia)

The Constructor, 2019. Determination of Water Content of Soil by Torsion Balance Method. In: https://theconstructor.org/geotechnical/determination-water-content-soil-torsion-balance-method/34965/ (consultado em 29 de Agosto de 2022).

Soil Management, 2018. How to Determine the Water Content of Soil?. In: https://www.soilmanagementindia.com/soil/determination-of-water-content/how-to-determine-the-water-content-of-soil/13320 (consultado em 29 de Agosto de 2022).

Usmen M.A., Kheng H.Y., 1986. Use of Microwave Oven for Rapid Determination of Moisture Content of Highway Materials. In: Statistically based acceptance procedures, quality assurance, and construction management. Transportation Research Board, 1056:68-75.

VDOT - Virginia Department of Transportation, Materials Division, 2019. Virginia Department of Transportation soils and aggregate compaction field certification study guide. 420 p.

Viana H.M.F., 2016. Prospecção e amostragem de solos (3ª parte). In: Notas de aulas de Mecância dos Solos I (parte 4a). Faculdade Tecnologia e Ciências . (https://engcivil20142.files.wordpress.com/2016/08/notas-de-aulas-parte-4amec-solos-i.pdf)