



João Pereira dos Santos

CONCEÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE PLUVIAÇÃO DE AREIA

CONCEPTION AND IMPLEMENTATION OF A SAND PLUVIATION SYSTEM

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Geotecnia,
orientada pelo Professor Doutor Paulo Miguel Cunha Matos Lopes Pinto e pelo Professor Doutor José Carlos Duarte Grazina

Coimbra, 07 de setembro de 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

João Pereira dos Santos

CONCEÇÃO E IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE PLUVIAÇÃO DE AREIA

CONCEPTION AND IMPLEMENTATION OF A SAND PLUVIATION SYSTEM

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Geotecnia,
orientada pelo Professor Doutor Paulo Miguel Cunha Matos Lopes Pinto e pelo Professor Doutor José Carlos Duarte Grazina

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões
que possa conter.

Coimbra, 7 de Setembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Com todo o percurso académico agora a chegar à parte final não posso deixar de agradecer a todas as pessoas que me acompanharam ao longo destes anos nesta caminhada, nem sempre fácil, mas que valeu a pena para poder chegar até aqui.

Ao Professor Doutor Paulo Pinto e ao Professor Doutor José Grazina por toda a orientação, por toda a transmissão de conhecimentos, por toda a exigência, disponibilidade e apoio incondicional durante a elaboração de todo este extenso projeto. Ao Sr. José António, uma palavra especial por todo o esforço para que tudo corresse de feição, por toda a disponibilidade e o rigor demonstrado na execução de todas as tarefas, por todos os ensinamentos ao longo destes meses, bem como por toda a simpatia e por todo companheirismo quando as coisas pareciam mais difíceis. Ao Professor Luís Santos por toda a disponibilidade, a partilha de conhecimento, o apoio assim como por toda a ajuda fulcral na execução dos diversos ensaios. Ao Sr. David, uma pessoa incrível em termos de imaginação e criatividade, por todas as sugestões e todas as horas de trabalho despendido em prol deste projeto.

Ao David Cortez, ao Rafael Cruz, ao Bruno Santos e ao André Bernardino por todos os momentos partilhados ao longo destes anos, por todos os trabalhos realizados juntos, todas as aventuras que me proporcionaram e, principalmente, por todas as recordações fantásticas que levarei comigo. À Telma Dias por me ter acompanhado em grande parte deste trajeto, por toda a motivação que me transmitiu, toda a ajuda, todo o apoio incondicional e por toda a paciência. A todos os meus amigos de Leiria e todos aqueles que tive o prazer de partilhar a aventura de Erasmus por todas as experiências, todos os momentos e por todo o apoio demonstrado.

Aos meus pais e ao meu irmão que sem eles nada disto teria sido possível, por reconhecimento de todo o esforço ao longo destes anos, por me terem permitido viver novas experiências, conhecer novos “mundos” e por toda a ajuda e apoio durante esta etapa.

A todos o meu sincero Obrigado!

Aos meus pais e à minha avó Maria Idalina.
À memória do meu padrinho Virgílio Pereira.

RESUMO

A preparação de modelos físicos em laboratório para o desenvolvimento de estudos no âmbito da modelação física de problemas geotécnicos requer a reprodução aproximada das características *in situ* da areia, o que por vezes é um processo bastante complexo. O presente projeto tem como objetivo fundamental o dimensionamento e a implementação de um equipamento automatizado de pluviação de areia para o tanque de ensaios do Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra que permita a redução da influência humana no processo de pluviação bem como o controlo de vários fatores, tais como a altura de queda, o fluxo de queda e a velocidade de deslocamento do dispositivo de pluviação, de modo a ser possível produzir modelos com uma determinada densidade relativa consoante o especificado.

A presente dissertação aborda aspetos e conceitos fundamentais para o estudo da pluviação de solos arenosos, nomeadamente a relação da densidade relativa de uma determinada areia com os diversos fatores que a influenciam. Além disso, são apresentados vários sistemas de pluviação para provetes de pequenas e grandes dimensões, que foram desenvolvidos ao longo do tempo com a descrição do seu funcionamento, das suas vantagens e desvantagens bem como dos valores de densidade relativa que são capazes de atingir.

Numa fase experimental inicial é apresentada a caracterização da areia utilizada para o dimensionamento do sistema de pluviação. Posteriormente, é descrito o desenvolvimento de um modelo reduzido para o sistema de pluviação a implementar. Este modelo esteve sujeito a diversos testes de pluviação para a obtenção de valores da densidade relativa de provetes com forma cilíndrica e paralelepípedica e perceber a influência dos vários fatores que podem contribuir para as diferentes densidades obtidas. Posteriormente, são apresentados os resultados e conclusões acerca dos diversos ensaios de pluviação realizados com os diferentes métodos e equipamentos adotados.

Palavras-chave:

sistema de pluviação; densidade relativa; areia; modelo reduzido

ABSTRACT

The preparation of physical models in laboratory for the development of studies in the physical modeling of geotechnical problems requires a reproduction of the *in-situ* characteristics of sand, which is a very complex process. The main goal of this project is to design and to implement an automative system of sand pluviation for the testing tank of the Geotechnical Laboratory of the Department of Civil Engineering of the University of Coimbra. This system allows the human influence reduction in the pluviation process and the control of various factors such as fall height, flow rate and displacement speed of the pluviator, in order to be able to produce models with a specified relative density.

The present dissertation deals with the fundamental questions and concepts about sandy soils pluviation, with respect to the relative density of a determined sand and several factors that influencing it. In addition, several small and large pluviation systems are presented, with a description of their operation, their advantages and disadvantages as the values that can be reached for the relative density.

In an initial experimental phase, the sand characterization used for the design of the pluviation system is presented. Later, the development of a reduced model for the pluviation system to be implemented was presented. Several pluviation tests were made for this system in order to obtain relative density values and to have knowledge about the factors which contribute to the different densities. Afterwards, all the results and conclusions regarding the various pluviation tests performed with different methods are presented.

Keywords:

pluviation system; relative density; sand; small-scale model

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
Palavras-chave:	iii
ABSTRACT	iv
Keywords:	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE QUADROS	x
SIMBOLOGIA E ACRÓNIMOS	xi
Simbologia	xi
Acrónimos	xi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Objetivos da dissertação	1
1.3. Organização da dissertação	2
2. CONCEITOS GERAIS SOBRE PLUVIAÇÃO DE AREIAS	4
2.1. Noções básicas sobre densidade relativa de areias	4
2.2. Pluviação de areia	9
2.3. Sistemas de pluviação de areia para provetes de pequenas dimensões	12
2.4. Sistemas de pluviação de areia para provetes de grandes dimensões	26
3. ENSAIOS LABORATORIAIS PREPARATÓRIOS	34
3.1. Considerações iniciais	34
3.2. Caracterização granulométrica da areia	34
3.3. Densidade das partículas sólidas	35
3.4. Índices de vazios de referência	36
3.4.1. Índice de vazios máximo (e_{max})	37
3.4.2. Índice de vazios mínimo ($e_{mín}$)	39
4. DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO À ESCALA REDUZIDA	41
4.1. Considerações iniciais	41

4.2. Desenvolvimento do modelo	41
5. ENSAIOS DE PLUVIAÇÃO.....	47
5.1. Considerações iniciais.....	47
5.2. Ensaio preliminares	47
5.3. Ensaio com baldes perfurados	48
5.3.1. Ensaio com peneiro de 2 mm.....	48
5.3.2. Ensaio sem peneiro	52
5.4. Ensaio com modelo à escala reduzida.....	57
5.5. Ensaio com modelo à escala reduzida no tanque de ensaios.....	61
6. CONCLUSÕES / TRABALHOS FUTUROS	68
6.1. Conclusões	68
6.2. Trabalhos Futuros	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Dependência do intervalo $e_{m\acute{a}x}-e_{m\acute{i}n}$ de uma areia em relação à curva granulométrica (adaptado de Matos Fernandes, 2011).	5
Figura 2.2 – Resultados entre duas amostras, uma solta e outra densa, relacionando as deformações axiais com os índices de vazios (adaptado de Matos Fernandes, 2006).	8
Figura 2.3 – Relação da velocidade de queda das partículas com a altura de queda, no meio aéreo e aquoso (adaptado de Vaid e Negussey 1984).	10
Figura 2.4 – Relação entre a velocidade de queda com o diâmetro das partículas (adaptado de Vaid e Negussey 1984).	11
Figura 2.5 – Esquema do pluviador desenvolvido por Lo Presti <i>et al.</i> (1992).	13
Figura 2.6 – Planta da posição dos moldes abaixo do sistema de pluviação (adaptado de Lo Presti <i>et al.</i> , 1992).	14
Figura 2.7 – Efeito da variação da intensidade de deposição da areia nos valores da densidade relativa da amostra (adaptado de Lo Presti <i>et al.</i> , 1993).	14
Figura 2.8 – Vista de cima do sistema de pluviação: 1) Abertura; 2) Placa móvel; 3) Lâminas de aberturas diferentes; 4) Motor (adaptado de Lo Presti <i>et al.</i> , 1993).	15
Figura 2.9 – Influência da velocidade da placa móvel e da abertura com a intensidade de deposição da areia (adaptado de Lo Presti <i>et al.</i> , 1993).	16
Figura 2.10 – Influência da velocidade da placa móvel e da abertura com a densidade relativa (adaptado de Lo Presti <i>et al.</i> , 1993).	17
Figura 2.11 – Pluviador para amostras com densidades médias a densas (adaptado de Stringer <i>et al.</i> , 2014).	18
Figura 2.12 – Pluviador para amostras com densidades baixas (adaptado de Stringer <i>et al.</i> , 2014).	19
Figura 2.13 – Esquema do novo pluviador desenvolvido na Universidade de Davis (adaptado de Stringer <i>et al.</i> , 2014).	20
Figura 2.14 – Densidades relativas alcançadas com o novo pluviador em relação à velocidade de rotação do tambor, em mm/s (adaptado de Stringer <i>et al.</i> , 2014).	21
Figura 2.15 – Pluviador automático (adaptado de Zhao <i>et al.</i> , 2006).	22
Figura 2.16 – Pormenor do pluviador e do seu respetivo bocal (adaptado de Zhao <i>et al.</i> , 2006).	22
Figura 2.17 – Relação entre o diâmetro da abertura com o fluxo de deposição (adaptado de Zhao <i>et al.</i> , 2006).	23
Figura 2.18 – Deslocamentos realizados pelo pluviador (adaptado de Zhao <i>et al.</i> , 2006).	23

Figura 2.19 – Relação entre a densidade relativa e o fluxo de queda para duas alturas de queda e diferentes tipos de moldes (adaptado de Zhao et al., 2006).....	24
Figura 2.20 – Sistema de pluviação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (1-Depósito; 2-Tremonha basculante motorizada) (adaptado de Gisela, 2012).....	25
Figura 2.21 – Sistema de pluviação PTP (adaptado de Gade <i>et al.</i> , 2015).....	27
Figura 2.22 – Relação entre a altura de queda e densidade relativa para as diferentes aberturas (adaptado de Gade et al., 2015).	29
Figura 2.23 – Influência do número de peneiros e da altura de queda com a densidade relativa para uma abertura de 8 (a), 10 (b) e 12 mm (c)) (adaptado de Gade et al., 2015).	30
Figura 2.24 – Esquema representativo do sistema de pluviação (lado esquerdo) e fotografia do sistema de pluviação presente no LNEC (lado direito) (adaptado de Oliveira <i>et al.</i> , 2012). ...	31
Figura 2.25 – Efeito da abertura no fluxo de queda (adaptado de Oliveira et al., 2012).....	32
Figura 2.26 – Influência da altura de queda para as diferentes velocidades na densidade relativa (adaptado de Carvalho, 2012).....	33
Figura 2.27 – Influência da altura de queda para as diferentes aberturas nos diferentes moldes na densidade relativa (adaptado de Carvalho, 2012).	33
Figura 3.1 – Curvas Granulométricas da areia em estudo.....	35
Figura 3.2 – Picnómetros usados nos ensaios.	36
Figura 3.3 – Agitação da proveta durante um ensaio.	37
Figura 3.4 – Leitura do volume final a olho nu.	38
Figura 3.5 – Colocação de uma camada de areia dentro do provete.	39
Figura 4.1 – Esboço da primeira ideia do modelo reduzido.	42
Figura 4.2 – Maquete em cartão do modelo reduzido a desenvolver.	43
Figura 4.3 – Esboço do pluviador visto lateralmente (figura de cima) e visto em planta (figura de baixo) devidamente cotado (medidas em centímetros).....	44
Figura 4.4 – Modelo reduzido do pluviador.	45
Figura 4.5 – Pormenor da parte inferior do pluviador.	45
Figura 4.6 – Sistema de pluviação com os respetivos carris.	46
Figura 4.7 – Cortina formada pela areia durante a pluviação.....	46
Figura 5.1 – Funis Perfurados utilizados nos ensaios preliminares.....	48
Figura 5.2 – Realização do processo de pluviação com utilização de um peneiro.....	50
Figura 5.3 – Variação da densidade relativa com a altura de queda com uso do peneiro.	51
Figura 5.4 – Variação da densidade relativa com a altura de queda para as diferentes aberturas.	55
Figura 5.5 – Variação da densidade relativa com o fluxo de queda para as diferentes alturas de queda.....	55
Figura 5.6 – Realização de um ensaio de pluviação sem peneiro e com o molde retangular. .	57

Figura 5.7 – Variação da densidade relativa com a altura de queda para as diferentes aberturas.	60
Figura 5.8 – Variação da densidade relativa com o fluxo de queda para as diferentes alturas de queda.....	60
Figura 5.9 – Pluviação de areia durante um ensaio sem utilização de malha.....	61
Figura 5.10 – Esquema do tanque de ensaios e alturas dos respetivos moldes onde foram realizados os ensaios de pluviação.	64
Figura 5.11 – Imagem real da colocação dos moldes dentro do tanque de ensaios.	64
Figura 5.12 – Pormenor dos provetes onde se verifica um maior preenchimento nos dois moldes centrais.....	65
Figura 5.13 – Colocação do pluviador e dos carris sobre o tanque em relação aos provetes...	65
Figura 5.14 – Variação da densidade relativa com a altura de queda consoante a abertura do pluviador.....	66
Figura 6.1 – Esboço do sistema de pluviação a ser implementado.	70

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Valores dos índices de vazios mínimo e máximo de alguns solos granulares (adaptado de Matos Fernandes, 2011).	6
Quadro 2.2 – Classificação dos solos arenosos quanto à compactidade (adaptado de Matos Fernandes, 2011).	7
Quadro 2.3 – Valores da densidade relativa obtidos para diferentes fluxos de queda, alturas de queda e forma dos moldes (adaptado de Zhao <i>et al.</i> , 2006).	24
Quadro 2.4 – Efeitos do tamanho da abertura dos furos na intensidade de deposição (adaptado de Gade <i>et al.</i> , 2015).	28
Quadro 3.1 – Resultados da densidade das partículas sólidas.	36
Quadro 3.2 – Resultados dos ensaios.	38
Quadro 3.3 – Resultados dos ensaios.	40
Quadro 5.1 – Dimensões do molde retangular.	49
Quadro 5.2 – Resultados da densidade relativa e respetivo desvio padrão.	50
Quadro 5.3 – Resultados da densidade relativa e respetivo desvio padrão.	51
Quadro 5.4 – Dimensões do molde circular grande.	52
Quadro 5.5 – Resultados da densidade relativa nos diferentes moldes.	53
Quadro 5.6 – Valores do desvio padrão dos resultados obtidos.	54
Quadro 5.7 – Resultados do fluxo de queda nos diferentes moldes.	54
Quadro 5.8 – Resultados da densidade relativa e respetivo desvio padrão.	58
Quadro 5.9 – Resultados do fluxo de queda.	58
Quadro 5.10 – Resultados da densidade relativa e respetivo desvio padrão.	59
Quadro 5.11 – Resultados obtidos para o fluxo de queda.	59
Quadro 5.12 – Dimensões do molde retangular nº2.	62
Quadro 5.13 – Dimensões do molde retangular nº3.	62
Quadro 5.14 – Dimensões do molde retangular nº4.	62
Quadro 5.15 – Resultados da densidade relativa e respetivo desvio padrão.	66

SIMBOLOGIA E ACRÓNIMOS

Simbologia

c_i – Comprimento do provete ($i=1,2,3,\dots$)
 C_C – Coeficiente de curvatura
 C_U – Coeficiente de uniformidade
 d_i – Diâmetro do provete ($i=1,2,3,\dots$)
 D_r – Densidade relativa
 e – Índice de vazios
 $e_{\text{máx}}$ – Índice de vazios máximo
 $e_{\text{mín}}$ – Índice de vazios mínimo
 G, G_s – Densidade das partículas sólidas
 h_i – Altura do provete ($i=1,2,3,\dots$)
 I_D – Índice de compacidade
 l_i – Largura do provete ($i=1,2,3,\dots$)
 m – Massa do provete
 V – Volume da proveta / Volume do provete
 W_s – Peso das partículas sólidas
 ϵ_a – Deformação axial
 γ – Peso volúmico
 γ_d – Peso volúmico seco
 γ_s – Peso volúmico das partículas sólidas
 γ_w – Peso volúmico da água

Acrónimos

ASTM – American Society for Testing and Materials
BS – British Standard
FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NP – Norma Portuguesa
PTP – Portable Traveling Pluviator

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A área da Geotecnia no ramo da Engenharia Civil tem como estudo principal os maciços rochosos, os solos e todas as obras geotécnicas. Quando se pretende realizar o dimensionamento e a construção de qualquer obra é preciso, numa primeira fase, estudar as principais características do solo interessado na obra tendo em vista adotar a melhor solução para o problema. O estudo do solo pode ser feito através de trabalhos de campo, embora, grande parte das vezes, seja realizado em laboratório, pelo que se terá de proceder à colheita de amostras *in situ* para ensaiar laboratorialmente. Todavia, a amostragem de solos arenosos de forma intacta é uma tarefa difícil, pelo que na generalidade dos casos haverá necessidade de reconstituir artificialmente em laboratório as condições *in situ*. Esta reconstituição consiste em repor aproximadamente as mesmas condições que o solo arenoso possui no local onde se pretende realizar a construção.

Uma das características determinantes para o comportamento de solos arenosos é o estado de compactação em que se encontra. A densidade relativa está relacionada com o arranjo das partículas de areia e a quantidade de vazios existentes entre elas, que faz com que um solo se encontre num estado mais solto ou num estado mais denso.

No presente trabalho pretende-se fazer um estudo inicial com a finalidade de criar um sistema automatizado e móvel, onde exista pouca influência humana para criar modelos de solo arenoso no tanque de ensaios do Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC), de modo a poder controlar a densidade de solos arenosos. Este sistema designa-se de “sistema de pluviação” e consiste em pluviar areia em condições de altura de queda e de fluxo definido de forma a controlar a velocidade de queda das partículas. Para esse fim torna-se necessário conhecer à priori a influência destes fatores no valor da densidade do modelo para que seja possível, através do seu controlo, obter as características de densidade que se pretende e que seja representativo do estado em que se encontra o solo arenoso *in situ*.

1.2. Objetivos da dissertação

Este projeto de investigação tem como objetivo final a criação de um sistema de pluviação a ser acoplado ao tanque de ensaios do Laboratório de Geotecnia da FCTUC. Para esse fim foi

definida uma sequência de objetivos que servem de base para a concretização do objetivo final. O primeiro objetivo consiste em perceber a definição e o funcionamento do processo de pluviação de areias, o que exige um levantamento do estado de arte acerca de sistemas de pluviação existentes, tanto para amostras pequenas como para modelos de grandes dimensões. Tal permitirá auxiliar na escolha do sistema mais adequado a implementar para o tanque de ensaios. Outro objetivo é a caracterização da areia a ser utilizada nos ensaios de pluviação, essencial para quantificar o parâmetro que define o estado de compactação da areia – a densidade relativa.

Com todo o levantamento de informação realizado bem como com a caracterização da areia estudada, será possível determinar os valores das densidades relativas obtidos nos ensaios de pluviação e perceber quais os fatores associados ao processo de pluviação que têm influência neste parâmetro, tais como os problemas e erros que possam ser cometidos ao longo desses ensaios.

Seguidamente, torna-se necessário desenvolver um modelo de pluviador à escala reduzida, tão fiel quanto possível do que se pretende construir, com a finalidade de avaliar a solução adotada em termos de operacionalidade assim como detetar possíveis problemas de funcionamento. Após a criação do modelo reduzido e com base no conhecimento adquirido, consideram-se criadas as bases que permitirão a construção de um equipamento de pluviação com a finalidade e características pretendidas a ser acoplado ao tanque de ensaios existente no Laboratório de Geotecnia da FCTUC.

1.3. Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se subdividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo diz respeito ao enquadramento do tema da dissertação bem como os objetivos do desenvolvimento da mesma.

No capítulo 2 encontra-se o enquadramento teórico e o estado de arte dos principais parâmetros necessários no decorrer do projeto e dos diversos sistemas de pluviação desenvolvidos ao longo dos anos, quer para grandes quer para pequenos provetes.

O capítulo 3 diz respeito à descrição dos procedimentos para o cálculo dos diversos parâmetros da areia escolhida para o projeto e a amostragem de resultados relativos à mesma.

O quarto capítulo diz respeito ao desenvolvimento e descrição de um modelo reduzido de pluviador, onde se pretendeu, numa escala mais pequena, dimensionar o tipo de sistema de pluviação a vir a ser desenvolvido posteriormente.

Já no capítulo 5 encontram-se todos os passos e procedimentos, bem como todos os resultados relativos aos diversos ensaios de pluviação para as diferentes técnicas e sistemas de pluviação.

Por último, o capítulo 6 diz respeito às conclusões retiradas de todos os resultados obtidos dos vários ensaios, assim como aos trabalhos futuros que possam vir a ser realizados para dar continuidade a este projeto.

2. CONCEITOS GERAIS SOBRE PLUVIAÇÃO DE AREIAS

2.1. Noções básicas sobre densidade relativa de areias

As areias são solos granulares, com origem a partir de detritos que se vão desagregando de rochas, seja por desintegração física ou decomposição química, onde a sua dimensão pode variar, nomeadamente o seu diâmetro.

Estes solos têm um predomínio de partículas grossas que são, na sua maioria, constituídas por quartzo e/ou sílica, sendo estes materiais quimicamente estáveis. Este facto leva a que as forças de interação entre as partículas e o exterior sejam, praticamente, de origem gravítica. Além disso, as partículas grossas são consideradas partículas esféricas por simplificação, isto porque, possuem direções ortogonais da mesma ordem de grandeza em três das suas dimensões levando a que sejam classificadas de equidimensionais (Matos Fernandes, 2006).

O comportamento que estes solos tomam depende, principalmente, do tamanho das suas partículas e da forma como se arranjam, existindo uma possibilidade infinita de arrumações. Em cada uma destas arrumações existe um volume de vazios, isto é, o volume de espaços não ocupados por partículas que, na sua maioria, são preenchidos por água ou por ar. O índice de vazios é o parâmetro que designa o quociente entre esse mesmo volume e o volume de partículas sólidas.

Quando se encontra um solo natural este possui um índice de vazios natural, parâmetro que pode variar no mesmo solo consoante o seu estado de compactação, mas que se encontra delimitado num dado intervalo. Este intervalo tem como extremos os valores do índice de vazios mínimo e do índice de vazios máximo, sendo ambos propriedades intrínsecas da areia e que podem ser determinados experimentalmente. O índice de vazios mínimo corresponde ao valor inferior do intervalo anteriormente referido, onde o volume de vazios resulta do melhor arranjo possível para evitar espaços vazios. Já o índice de vazios máximo corresponde ao valor máximo que o índice de vazios pode tomar, onde as partículas se encontram com o pior arranjo possível e no seu estado mais solto.

Os valores que representam o intervalo relativo ao índice de vazios estão associados à própria granulometria da areia. A granulometria de uma areia depende da variedade da dimensão das partículas que a constituem, podendo uma areia ser bem ou mal graduada. Uma areia bem graduada possui uma granulometria extensa, isto é, tem uma grande variedade de partículas

com diferentes dimensões, o que torna o intervalo de valores para o índice de vazios mais amplo. Consequentemente, uma boa graduação da areia leva a que o índice de vazios mínimo tome valores inferiores em relação a outras areias, pois as partículas de menor dimensão reorganizam-se com as partículas de maiores dimensões, produzindo assim um arranjo bastante compacto. Todavia, uma areia mal graduada possui uma granulometria pobre, pois é composta apenas por partículas com dimensões semelhantes entre si, levando assim a um intervalo de valores para o índice de vazios mais limitado. Além disso, o índice de vazios mínimo neste tipo de areias com má graduação tende a ser mais elevado, sendo notório quando se idealiza uma situação com partículas de dimensões semelhantes a tentar reorganizarem-se umas nas outras, percebendo-se que é bastante difícil obter uma arrumação compacta (Figura 2.1) (Matos Fernandes, 2006).

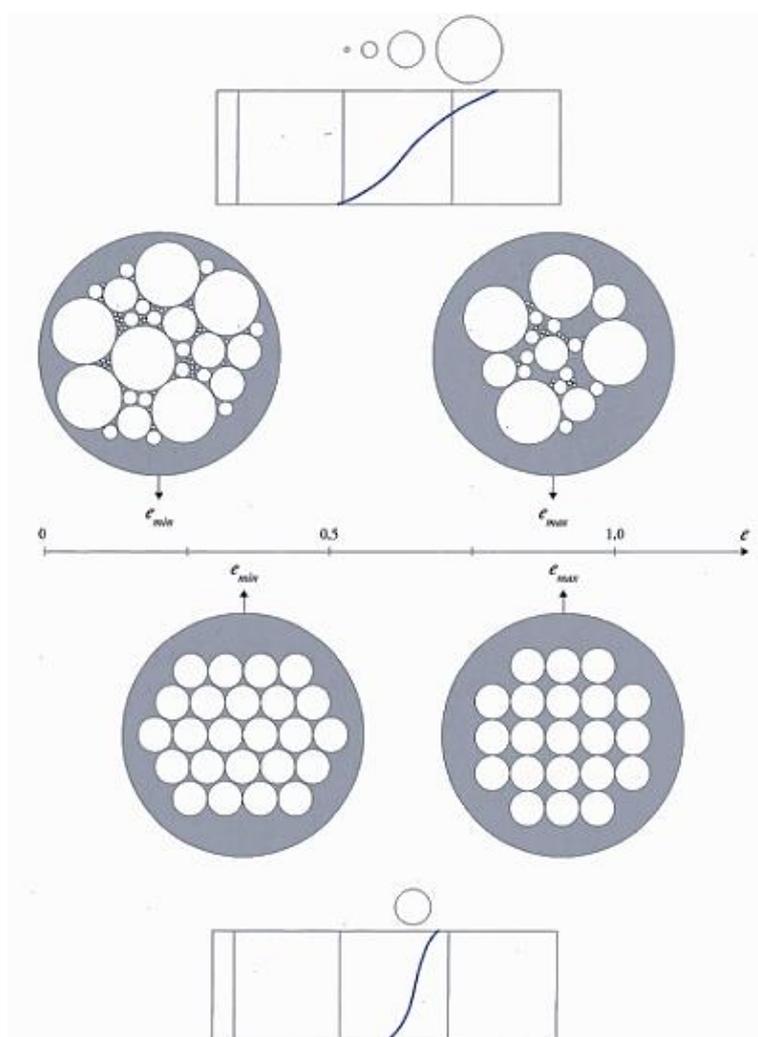


Figura 2.1 – Dependência do intervalo $e_{\max}-e_{\min}$ de uma areia em relação à curva granulométrica (adaptado de Matos Fernandes, 2011).

A determinação experimental destes índices físicos, índices de vazios mínimo e máximo, é realizada em laboratório através de ensaios normalizados. Atualmente, existem diversas normas para a determinação destes índices físicos, como é o caso BS (1990) e ASTM (2006a, 2006b).

Seguidamente, no Quadro 2.1, são apresentados alguns valores de referência para os índice de vazios mínimo e máximo em função das características granulométricas e da constituição dos solos arenosos.

Quadro 2.1 – Valores dos índices de vazios mínimo e máximo de alguns solos granulares (adaptado de Matos Fernandes, 2011).

Solos Granulares	Índice de vazios	
	$e_{máx}$	$e_{mín}$
Esferas de igual diâmetro	0,91	0,35
Areia uniforme	1,00	0,40
Silte uniforme e inorgânico	1,10	0,40
Areia siltosa	0,90	0,30
Areia (mistura de fina e grossa)	0,95	0,20
Areia com mica	1,20	0,40
Areia, silte e cascalho misturados	0,85	0,14

As areias, como foi referido anteriormente, possuem um determinado intervalo de valores referentes ao espaço vazio existente entre as suas partículas, o que levará a que as amostras/modelos de areia não sejam todos iguais em termos de densidade, isto é, uma determinada areia pode ser mais solta ou mais densa consoante a existência de vazios entre as partículas. A existência destes vazios, na maioria das vezes, em que resulta uma amostra solta provém do facto desse solo arenoso não ter sofrido carregamentos que provocassem tensões nas partículas, que as obrigaria a rearranjarem-se e a ocuparem melhor os espaços entre si. As partículas de areia quando sujeitas a um carregamento, que não seja um carregamento por corte, encontram-se melhor agrupadas, levando a que essa amostra fique mais densa do que estaria anteriormente. O parâmetro que define esta característica de uma amostra/modelo é a densidade relativa, ou índice de compacidade, que é dado pela seguinte expressão:

$$D_R = \frac{e_{máx} - e}{e_{máx} - e_{mín}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

Os valores resultantes da fórmula anterior podem variar entre 0 e 100%, pelo que é possível avaliar e classificar o estado de compacidade de uma areia a partir da sua densidade relativa (Quadro 2.2). Além disso, a fórmula anteriormente mencionada, relaciona o quociente entre os

vários valores dos índices de vazios, natural, máximo e mínimo, pelo que se pode facilmente concluir que quanto maior for o índice de vazios natural de uma amostra *in situ*, menor será a densidade relativa dessa amostra. Isto ocorre porque os valores dos índice de vazios máximo e mínimo são constantes para uma mesma areia e o único valor que varia na fórmula é o índice de vazios natural.

Quadro 2.2 – Classificação dos solos arenosos quanto à compacidade (adaptado de Matos Fernandes, 2011).

Areia	DR (%)
Muito solta	0 - 20
Solta	20 - 40
Medianamente compacta	40 - 60
Compacta ou densa	60 - 80
Muito compacta ou muito densa	80 - 100

Como foi possível observar pela expressão anterior, é necessário saber à priori o valor do índice de vazios natural da amostra para ser possível o cálculo da sua densidade relativa. O índice de vazios natural, porém, depende de parâmetros fundamentais para o seu cálculo, como é o caso do peso volúmico seco da amostra e a densidade das partículas da areia. A expressão seguinte relaciona o peso volúmico seco de uma amostra com a densidade das partículas da areia, o peso volúmico da água e o índice de vazios natural.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{\gamma_s}{1+e} = \frac{G_s \times \gamma_w}{1+e} \quad (2)$$

O cálculo para o valor do peso volúmico seco de uma amostra é feito através do volume de vazios existentes nessa amostra, pelo que se torna necessário saber a massa de material arenoso que se encontra num recipiente com um determinado volume. Todavia, através da expressão anterior, verifica-se que existem outros parâmetros relacionados com o índice de vazios natural, como é o caso da densidade das partículas da areia e do peso volúmico da água. A densidade das partículas da areia pode ser determinada experimentalmente, enquanto que o peso volúmico da água possui um valor de aproximadamente 9,81 kN/m³ a 20°C, obtido pela multiplicação da sua massa volúmica pela aceleração da gravidade.

A densidade relativa das areias é de extrema importância quando se refere a parâmetros de deformação e de resistência de areias. A resistência de um solo arenoso depende, como não podia deixar de ser, do tipo de partículas que o constituem, mas também da ligação que existe entre essas mesmas partículas. A rigidez de uma amostra de areia depende da arrumação das

partículas, que por sua vez está relacionada com a quantidade de vazios e com as forças entre partículas, quer sejam forças de atrito quer forças devido aos arranjos “perfeitos” que as partículas criam entre si. Com isto, facilmente se percebe que quanto mais compacta e densa for uma amostra de areia, maior será a rigidez e a resistência que a mesma oferece às cargas à qual está submetida; já uma amostra mais solta encontra-se com uma maior quantidade de vazios que leva a que a sua rigidez e resistência sejam menores. Em termos de deformação pode-se observar a Figura 2.2, no qual o índice de vazios de uma amostra é comparado com a deformação axial de amostras de uma areia, no estado solto e no estado denso, quando sujeitas a um carregamento axial (Matos Fernandes, 2006).

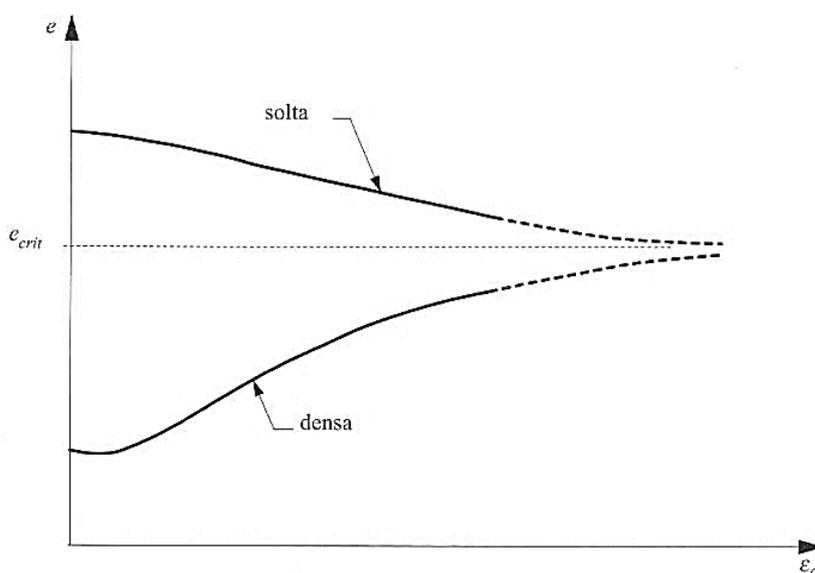


Figura 2.2 – Resultados entre duas amostras, uma solta e outra densa, relacionando as deformações axiais com os índices de vazios (adaptado de Matos Fernandes, 2006).

A figura acima mostra que uma amostra de areia solta vai diminuindo o seu índice de vazios com a deformação de corte que vai sofrendo, devido à aplicação da carga, até se tornar praticamente constante para um determinado valor de índice de vazios. Já uma amostra densa tem um comportamento diferente, em que, com o aumento da deformação, o seu índice de vazios tende a aumentar até um determinado valor devido à destruição dos arranjos que as partículas possuíam entre si. Algo curioso é que tanto as amostras densas como as soltas tendem para o mesmo valor de índice de vazios, designado de índice de vazios crítico, relacionado com as variações volumétricas da amostra que levam a que as amostras possuam a mesma densidade relativa (Matos Fernandes, 2006).

2.2. Pluviação de areia

Por vezes a recolha de amostras de solos arenosos para os mais diversos ensaios torna-se bastante complicada, pelo que é necessário encontrar um método capaz de reproduzir o solo *in situ*. O solo possui uma determinada densidade, pelo que é essencial encontrar um método que permita controlar e obter a densidade desejada com alguma viabilidade e rigor. O processo mais utilizado é o de pluviação aérea de areia seca que é capaz de reproduzir o solo *in situ* em termos de densidades pretendidas para o caso de estudo e garantir a uniformidade do mesmo, qualquer que seja a geometria do recipiente (Coelho *et al.*, 2006).

Este processo de pluviação consiste na queda das partículas de areia através do ar, a uma altura de queda para o interior de um molde, com um fluxo controlado. É perceptível que uma maior altura de queda e um menor fluxo origina valores altos de densidade relativa, enquanto uma menor altura de queda e um maior fluxo resultam em valores mais baixos (Santos, 2009; Santos, 2015).

O termo “pluviação” não existe na língua portuguesa, contudo designa-se assim este método como alternativa a processo de deposição gravitacional, isto porque a queda das partículas ocorre unicamente devido à força gravitacional (Fonseca, 2017).

O processo de pluviação aérea de areia seca é, por vezes, um processo difícil devido ao facto de durante o enchimento do molde o provete/modelo deixa de ter uniformidade junto às paredes deste molde. Este problema de uniformidade acontece devido aos efeitos das condições de fronteira, em que as partículas de areia se acumulam junto às paredes do molde, sendo que em amostras mais soltas é mais frequente a ocorrência dos seus efeitos (Fretti *et al.*, 1995).

As densidades relativas obtidas pelo processo de pluviação para os provetes/modelos são influenciadas por diversos fatores, nomeadamente: a altura de queda, o fluxo de deposição, o modo de deposição, o meio de deposição, a forma do molde e a forma das partículas de areia (Bilé Serra, 1998; Zhao *et al.*, 2006).

A altura de queda é a diferença de alturas entre o ponto onde se inicia a queda livre das partículas e a superfície de deposição do molde utilizado. A altura de queda tem influência direta nos valores da densidade relativa pois a velocidade de queda é dependente desta, pelo que quanto maior for a altura maior será a velocidade atingida pelas partículas de areia. Todavia, existe um determinado valor da altura de queda a partir do qual a velocidade deixa de aumentar, tornando-se aproximadamente constante, mesmo com o aumento da altura de queda, que se designa de

altura crítica. Acima desta altura crítica a velocidade de queda é constante pelo que a energia cinética também se torna constante, o que se deve às forças de atrito geradas pela viscosidade do ar (Bilé Serra, 1998; Portugal, 1998). Além disso, o aumento da velocidade não é linear com o aumento da altura de queda de acordo com Vaid & Negussey (1984) (Figura 2.3).

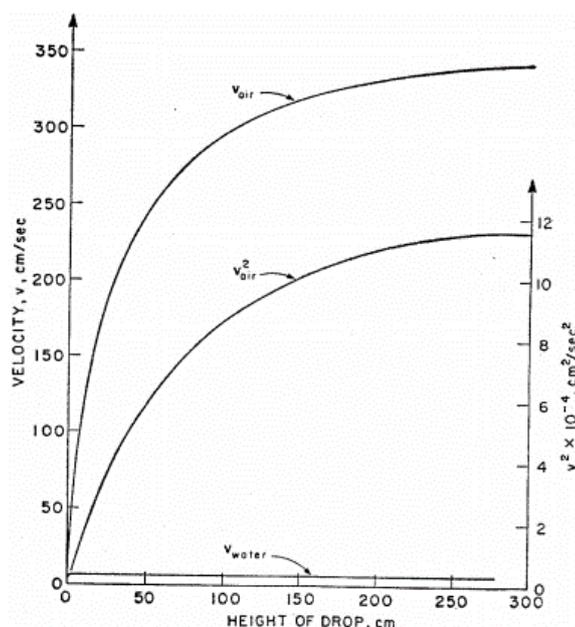


Figura 2.3 – Relação da velocidade de queda das partículas com a altura de queda, no meio aéreo e aquoso (adaptado de Vaid e Negussey 1984).

O fluxo de deposição é outro fator que influencia os valores da densidade relativa, que corresponde à massa que preenche o volume de um recipiente num determinado período de tempo (Bilé Serra, 1998). A densidade relativa aumenta com a diminuição do fluxo, ainda que o fluxo seja influenciado pelo tamanho e pelo número de aberturas do sistema de pluviação, pois aberturas reduzidas e em baixo número podem levar à colmatação das mesmas (Miura & Toki, 1982).

O modo de deposição tem a ver com o facto de se utilizar um sistema de pluviação móvel ou estacionário. Um sistema estacionário leva a que o sistema de pluviação permaneça na mesma posição ao longo de todo o processo, pelo que com o preenchimento do molde a altura de queda irá diminuindo. Já num sistema de pluviação móvel isso não ocorre, pois o sistema mantém a altura de queda constante com o preenchimento do molde ajustada através de um movimento vertical. Além disso, o sistema de pluviação móvel pode não realizar movimentos verticais, mas sim horizontais, como é o caso dos chuveiros de areia em cortina, pelo que a altura de queda

vai diminuindo consoante o preenchimento do molde, por outro lado a velocidade de translação passa a ser um parâmetro com influencia nos valores da densidade relativa (Bilé Serra, 1998).

O meio de deposição para o processo de pluviação de areias mais utilizado é o ar, pelo que é necessário ter em conta a sua viscosidade já que influencia a altura de queda crítica como referido anteriormente. Contudo, existem outros meios onde se podem realizar processos de pluviação, nomeadamente o meio aquoso ou sob vácuo (Bilé Serra, 1998).

A forma dos moldes utilizados para receber a deposição das partículas de areia aquando da realização do processo de pluviação, é também um fator influenciável dos valores de densidade relativa a serem obtidos. Segundo Zhao *et al.* (2006) existem diferenças na ordem dos 15% para as densidades relativas usando moldes circulares, retangulares e quadrados. Esta diferença acontece devido aos efeitos das condições de fronteira já anteriormente explicitados.

Por fim, a forma das partículas de areia influencia os valores da densidade relativa, isto porque para uma dada altura de queda, uma partícula com um diâmetro inferior em relação a uma outra com um diâmetro considerável possui uma menor energia de impacto na deposição, pelo que origina valores mais baixos de densidade relativa. Além disso, a velocidade de queda é função do diâmetro das partículas, onde com um aumento do diâmetro existe um aumento linear da velocidade de queda, segundo Vaid & Negussey (1984) (Figura 2.4).

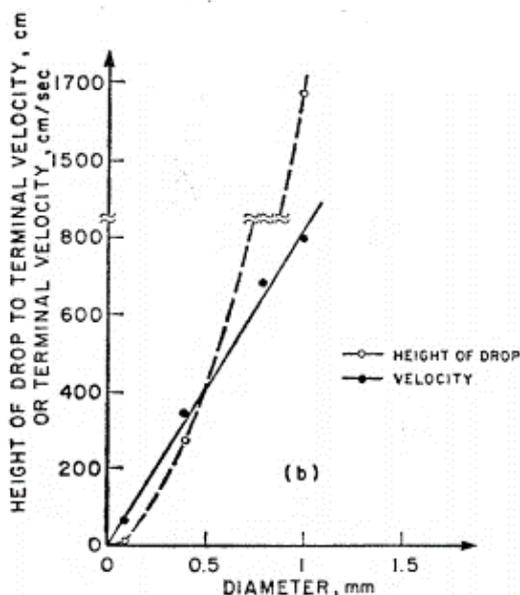


Figura 2.4 – Relação entre a velocidade de queda com o diâmetro das partículas (adaptado de Vaid e Negussey 1984).

Nos dias de hoje, existem diversos sistemas de pluviação de areia seca, tanto para criação de pequenas amostras como para modelos de grande escala. Os dispositivos de pluviação de areias existentes podem ser divididos em três categorias: os pluviadores pontuais, os pluviadores em cortina e os pluviadores em tapete. Os pluviadores pontuais são aqueles em que a pluviação de areia é feita por uma abertura relativamente pequena que se desloca ao longo de toda a superfície da amostra/modelo e também em altura, permitindo assim cobrir toda a área de deposição bem como manter uma altura de queda constante. Já os pluviadores em cortina são sistemas que contêm uma pequena abertura ao longo de um comprimento que faz a pluviação no qual o seu deslocamento é feito lateralmente ao longo de toda a superfície de deposição. Além disso, em alguns sistemas é possível o deslocamento vertical que permite manter a altura de queda constante. Por último, os pluviadores em tapete são dispositivos em que a pluviação é realizada ao longo de toda a área da superfície de deposição, ocorrendo apenas o movimento vertical para manter a altura de queda constante. Todavia, em todos estes sistemas de pluviação por vezes o movimento vertical para manter a altura de queda constante não é possível (Stringer *et al.*, 2014).

2.3. Sistemas de pluviação de areia para provetes de pequenas dimensões

Atualmente são muitos os sistemas de pluviação que existem espalhados pelo mundo fora, o que se deve ao desenvolvimento contínuo que tem ocorrido ao longo de anos para fazer face às exigências e às necessidades de se obterem amostras com densidades relativas controladas. O desenvolvimento destes equipamentos prende-se com o facto de ter de haver um maior rigor no processo de pluviação bem como uma maior viabilidade e confiabilidade nos resultados obtidos através dos vários métodos de pluviação. Os sistemas de pluviação permitem criar amostras para mais tarde serem submetidas aos mais diversos testes laboratoriais, como é o caso de ensaios triaxiais, ensaios de caixas de corte, ensaios em centrífugadora, ensaios no *hollow-cylinder* entre muitos outros.

Em 1992, Lo Presti *et al.*, acharam necessário realizar um estudo comparativo acerca de dois métodos para tentar obter a máxima densidade de solos secos, sendo que um dos métodos dessa comparação foi o método da pluviação. Segundo estes autores, o processo de pluviação oferece diversas vantagens comparativamente com um método normalizado ASTM, nomeadamente valores mais altos para a densidade relativa, não ocorre quebra das partículas, minimiza o efeito de segregação, permite a repetibilidade do processo e, por último, é realizado com maior facilidade e em menos tempo de execução.

O método de pluviação adotado teve como base o sistema anteriormente desenvolvido por Miura & Toki (1982), no qual era utilizado uma única abertura com múltiplos peneiros para a preparação de amostras que posteriormente seriam submetidas a ensaios triaxiais (Figura 2.5). Tendo como base a referência anteriormente mencionada, Lo Presti *et al.* (1992) desenvolveu um sistema que possuía uma tremonha na sua parte superior capaz de conter cerca de 20 kg de areia, a qual teria uma abertura manual na sua base com um diâmetro que poderia variar entre os 5 e os 70 mm. Cerca de 40 cm mais abaixo da abertura estavam colocados seis peneiros padrão ASTM, rodados horizontalmente 45° uns em relação aos outros, tudo isto para criar um efeito de dispersão das partículas de areia e não um efeito de peneiração. Abaixo dos peneiros estavam localizados os moldes com uma distância de cerca de 50 cm entre o topo dos mesmos e a base do último peneiro.

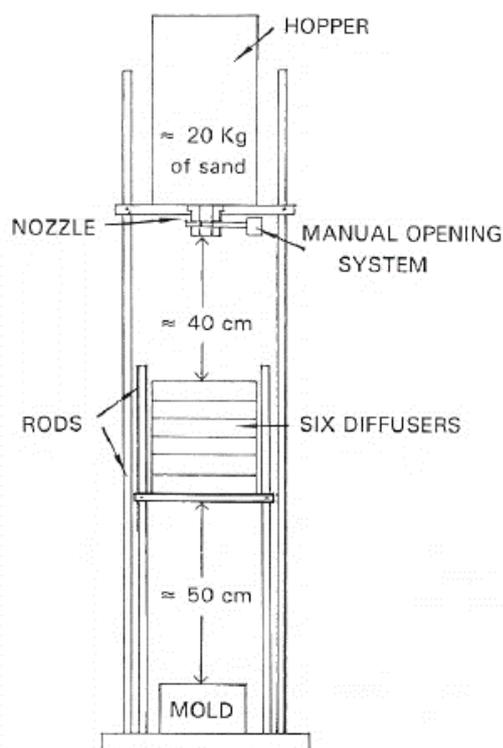


Figura 2.5 – Esquema do pluviador desenvolvido por Lo Presti *et al.* (1992).

Os ensaios realizados neste sistema de pluviação continham cinco moldes na sua base, onde o molde central estava alinhado verticalmente sob a abertura da tremonha (Figura 2.6). Em todos os ensaios foram retirados os valores dos seguintes parâmetros para cada molde: o peso do solo; o tempo necessário ao preenchimento do molde e a distribuição dos tamanhos das partículas (Lo Presti *et al.*, 1992).

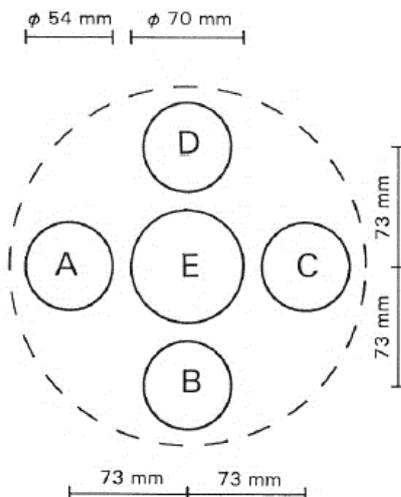


Figura 2.6 – Planta da posição dos moldes abaixo do sistema de pluviação (adaptado de Lo Presti *et al.*, 1992).

O sistema de pluviação adotado por Lo Presti *et al.* (1992) tinha como principal objetivo avaliar a uniformidade das amostras através dos valores das densidades relativas obtidas. Na uniformidade das amostras, houve uma clara diferença do molde central para os moldes que se encontravam na parte lateral, onde no primeiro a intensidade de deposição foi mais elevada levando a que a densidade relativa da amostra baixasse, enquanto nos moldes laterais houve menor fluxo de deposição levando assim à obtenção de valores mais altos para a densidade relativa (Figura 2.7). Todavia, a falta de uniformidade nas amostras obtidas foi mais relevante em amostras mais soltas do que em amostras mais densas, sendo este fator regulado pelo fluxo de queda.

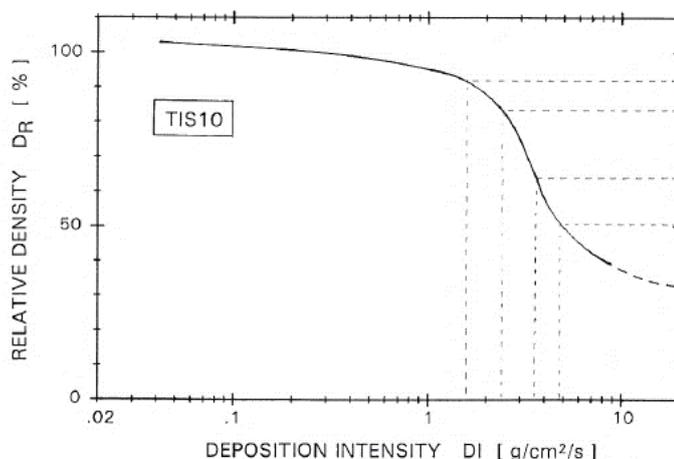


Figura 2.7 – Efeito da variação da intensidade de deposição da areia nos valores da densidade relativa da amostra (adaptado de Lo Presti *et al.*, 1993).

Em 1993, Lo Presti, Berardi, Pedroni, & Crippa, desenvolveram um novo pluviador, desta vez um pluviador móvel para a reconstituição de pequenas amostras para serem submetidas a testes laboratoriais. Segundo os autores, os pluviadores móveis são preferenciais em relação aos estacionários pois permitem superar certas adversidades, como é o caso da uniformidade da amostra do solo, tanto em termos de densidade relativa como em termos de distribuição do tamanho das partículas pela amostra, sendo este último fator bastante importante para areias bem graduadas contendo finos. O desenvolvimento deste aparelho tinha como objetivos principais os seguintes: obter uma técnica viável, de baixo custo e não demorada no seu processo para a reconstituição de amostras de solo, de modo a minimizar o efeito de segregação das partículas, e ainda obter informação útil para a reconstituição de modelos de areia em grande escala.

O sistema desenvolvido consiste numa tremonha fixa para a colocação do solo, com uma placa de metal na sua base que tem uma abertura retangular ajustável, através da substituição da peça da abertura, consoante o fluxo de queda pretendido. Esta placa de metal colocada na base da tremonha realiza movimentos horizontais durante o processo de pluviação onde a queda das partículas de areia forma uma cortina. Os movimentos horizontais são controlados por um motor que pode variar a velocidade de deslocamento entre os 0 aos 10 cm/s. Além disso, existe um interruptor que permite o operador fazer a inversão do deslocamento horizontal da placa de metal (Figura 2.8) (Lo Presti *et al.*, 1993).

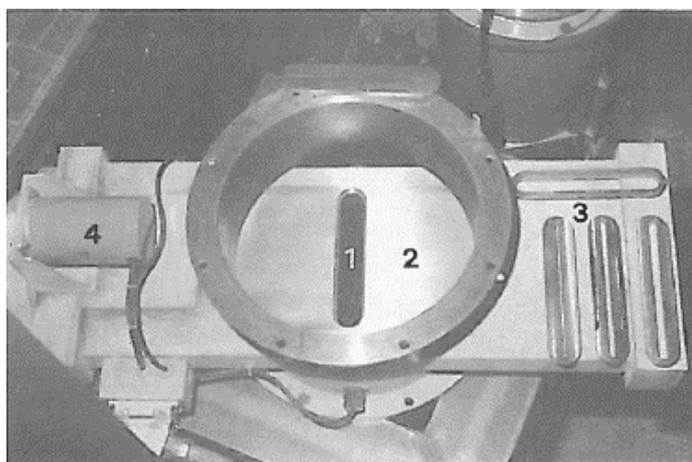


Figura 2.8 – Vista de cima do sistema de pluviação: 1) Abertura; 2) Placa móvel; 3) Lâminas de aberturas diferentes; 4) Motor (adaptado de Lo Presti *et al.*, 1993).

Como visto por Lo Presti *et al.* (1992), a densidade relativa é inversamente proporcional à intensidade de deposição, pelo que neste sistema a intensidade de deposição é controlada por dois fatores: a velocidade da placa de metal e a largura da abertura colocada na base da

tremonha. Os testes de pluviação foram realizados no meio aéreo e utilizou-se um molde com 7,1 cm de diâmetro e 14 cm de altura, sendo que a distância entre a abertura e o topo do molde, com cerca de 86 cm, se manteve constante ao longo de todo o processo.

A intensidade de deposição foi obtida para dois tipos de solo arenoso e para duas velocidades da placa de metal, de 3 e 8 cm/s. O aumento da largura da abertura leva a um aumento da intensidade de deposição, além disso à medida que a velocidade da placa de metal aumenta, a intensidade de deposição diminui para uma determinada largura da abertura. (Figura 2.9)

Já a densidade relativa para as duas velocidades anteriormente mencionadas, desta vez para um único tipo de solo arenoso, é facilmente perceptível através da Figura 2.10 que com um aumento da largura de abertura diminuem os valores atingidos para a densidade relativa da amostra. É observável o intervalo de valores que a densidade relativa pode tomar, podendo ir cerca dos 35% aos 93%. Outra conclusão que se pode retirar é que para aberturas acima de 1 cm, a densidade relativa deixa de ser influenciada pela abertura (Lo Presti *et al.*, 1993).

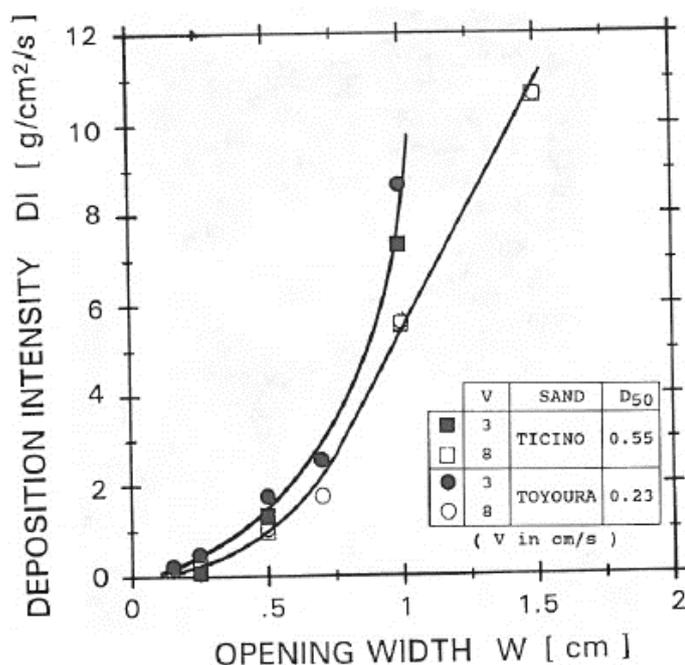


Figura 2.9 – Influência da velocidade da placa móvel e da abertura com a intensidade de deposição da areia (adaptado de Lo Presti et al., 1993).

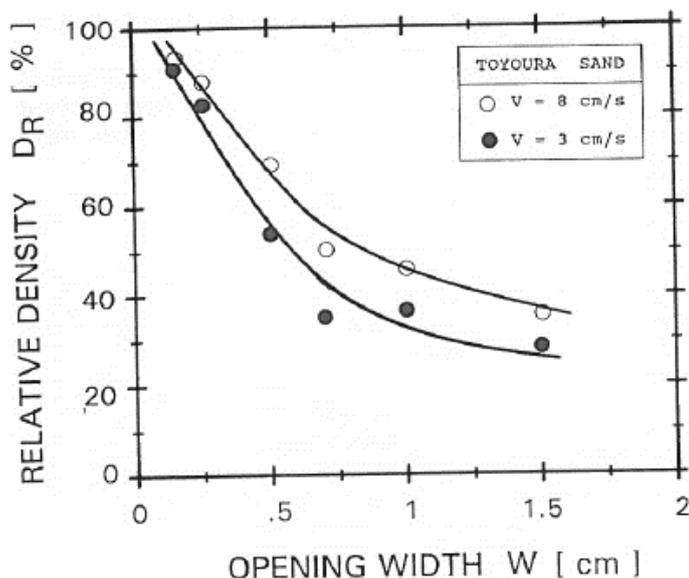


Figura 2.10 – Influência da velocidade da placa móvel e da abertura com a densidade relativa (adaptado de Lo Presti et al., 1993).

Seguidamente, serão apresentados dois diferentes sistemas de pluviação utilizados pela Universidade de Davis e o desenvolvimento de um novo sistema de pluviação utilizado atualmente para criar amostras para serem submetidas a ensaios em centrífugadora.

No seu passado, a Universidade de Davis possuía dois diferentes sistemas de pluviação, um para criação de modelos de areia com densidades médias a densas e outro para criação de modelos soltos.

O sistema para criação de modelos densos foi, numa primeira fase, projetado para que a pluviação ocorresse em toda a superfície de deposição, verificando-se, contudo, que as correntes de ar inviabilizam o processo de pluviação, o que obrigou à instalação de uma tremonha na secção central do pluviador de modo a reduzir a área de pluviação, reduzindo assim de forma significativa as correntes de ar.

O fluxo de deposição deste sistema é controlado através de ripas de madeira dispostas umas sobre as outras de forma horizontal e paralela. Estas duas camadas de ripas possuem um espaçamento entre si, sendo que quando não está a ocorrer o processo de pluviação, ambas estão posicionadas de modo a que as aberturas de uma camada não se alinhem com a outra. Porém, quando está a ocorrer a pluviação de areia, a camada inferior possui deslocamentos periódicos ao longo do seu comprimento, através de um motor, permitindo que a areia seja pluviada por entre as aberturas que em intervalos alternados se encontram abertas através do deslizamento

da placa inferior. A dimensão da abertura é controlada através do ajuste das camadas de ripas de madeira e da velocidade do motor que faz com que a velocidade de alternância entre a abertura e o fecho das perfurações seja mais lenta ou mais rápida.

Abaixo das aberturas existem duas malhas de arame que têm a função de espalhamento das partículas de areia que é pluvizada pelas aberturas. Em tempos passados, este sistema chegou a atingir densidades relativas na ordem dos 55%. Todavia, é de realçar que apesar da instalação da tremonha no centro do pluviador, ainda há existência de correntes de ar dentro dos recipientes de deposição o que leva a que a quantidade de partículas finas que são lançadas ao ar aumente, levando assim à irregularidade da superfície de deposição e à não uniformidade da densidade do modelo (Stringer *et al.*, 2014).



Figura 2.11 – Pluviador para amostras com densidades médias a densas (adaptado de Stringer *et al.*, 2014).

Já o sistema de criação de modelos de areia soltos tinha como objetivo obter modelos para a realização de testes sobre os efeitos da liquefação das areias, sendo que, normalmente, a gama de valores que se pretendia obter para a densidade relativa era entre os 40 e os 50%. Este sistema era constituído por uma tremonha que tinha uma ligação a um tubo flexível, onde o fluxo de queda era controlado através de um conjunto de malhas colocadas junto ao tubo de saída. Com a utilização deste tipo de sistema era possível obter modelos bastante soltos, através de elevados fluxos de queda. Contudo, este sistema de pluviação tinha algumas desvantagens como é o facto de ser bastante difícil manter uma determinada densidade relativa ao longo de todo o modelo,

assim como também devido à movimentação manual do tubo de saída (Figura 2.12) (Stringer *et al.*, 2014).

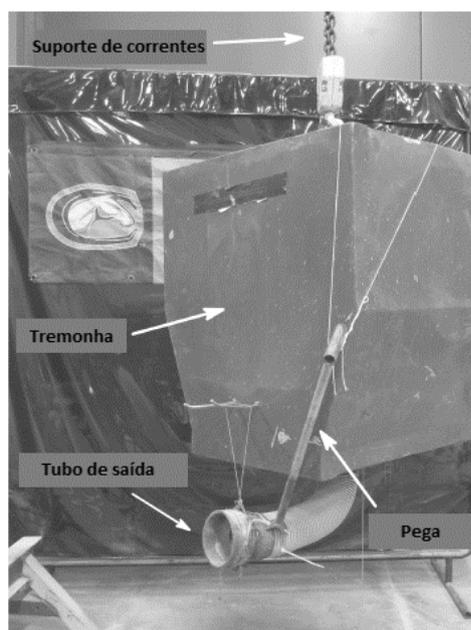


Figura 2.12 – Pluviador para amostras com densidades baixas (adaptado de Stringer *et al.*, 2014).

Nos dias de hoje, a Universidade de Davis desenvolveu um novo tipo de pluviador que utiliza na criação de modelos para os seus testes em centrífugadora, que facilita o controlo do sistema de pluviação e permite, a repetibilidade das densidades relativas alcançadas e ainda garantir a uniformidade de toda a amostra. Além disso, este novo sistema pode ser usado por operadores sem formação para o efeito, realizar o processo de pluviação num curto período de tempo e obter uma gama extensa de valores para as densidades das amostras, gama essa variável dos 40 aos 90% de densidade relativa. O desenvolvimento deste sistema tinha como principal preocupação evitar as correntes de ar que os antigos sistemas provocavam.

O sistema de pluviação é constituído por uma tremonha com uma capacidade de 0.25 m³ e que não possui qualquer fundo. Porém, no fundo da tremonha existem duas paredes inclinadas de cerca de 30° que faz com que haja uma redução na largura da tremonha para 100 mm. Abaixo da abertura da tremonha existe um tambor cilíndrico que possui diversas ranhuras em espiral. Estas ranhuras prolongam-se ao longo de todo o comprimento do tambor e dispostas de forma inclinada em relação ao eixo do tambor. Ao longo de todo o perímetro de abertura da tremonha existem pequenas escovas que impedem a passagem das partículas de areia no espaçamento

que existe entre a tremonha e o tambor, realizando-se apenas a passagem das partículas de areia pelas ranhuras do tambor (Figura 2.13) (Stringer *et al.*, 2014).

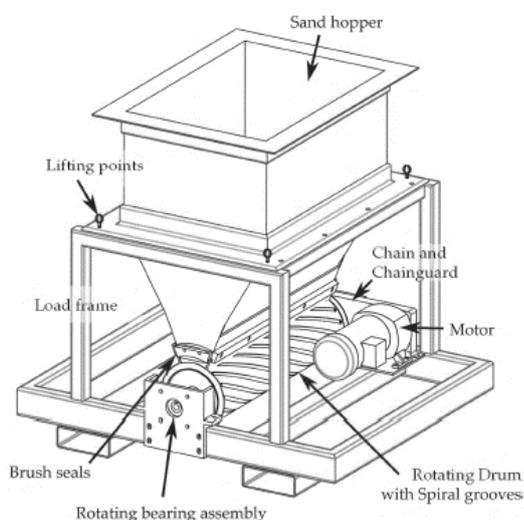


Figura 2.13 – Esquema do novo pluviador desenvolvido na Universidade de Davis (adaptado de Stringer *et al.*, 2014).

O tambor efetua movimentos rotativos com a ajuda a um pequeno motor elétrico no qual a velocidade pode ser ajustada consoante o pretendido pelo operador, sendo essencial para o controlo do fluxo de deposição da areia. Já o movimento de translação do sistema de pluviação é controlado através de um sistema em controlo remoto de ganchos que permite o movimento ao longo dos três eixos. Este sistema permite então controlar a deposição ao longo de todo o modelo bem como a altura de queda das partículas de areia.

A realização de testes de pluviação com o sistema apresentado teve como objetivo determinar as densidades relativas para as diferentes alturas de queda e diferentes velocidades impostas no tambor do sistema. Em todos estes testes foi utilizado um recipiente de deposição cilíndrico de 144 mm de diâmetro e 101 mm de altura. Além disso, a altura de queda foi mantida sempre constante ao longo dos ensaios, com recurso ao sistema de ganchos, bem como a velocidade de deslocamento horizontal desse mesmo sistema, de cerca de 1 cm/s.

Os ensaios realizados tiveram como base três alturas de queda (500 mm, 750 mm e 1000 mm) e diversas velocidades de rotação do tambor. Como se pode verificar, ao analisar a Figura 2.14, para uma determinada velocidade do tambor obtém-se praticamente a mesma densidade relativa para as alturas de queda de 750 mm e 1000 mm, isto porque a altura de queda de 750 mm pode ser a altura crítica desta areia ou até pode já estar acima desta, fazendo com que um aumento

da altura de queda não vá influenciar de forma significativa o valor da densidade relativa. Porém, a diminuição da altura de queda para os 500 mm já levou a que ocorresse uma diminuição nos valores de densidade relativa. Com este sistema de pluviação pode-se obter densidades a variar entre os 41% e os 99% (Stringer *et al.*, 2014).

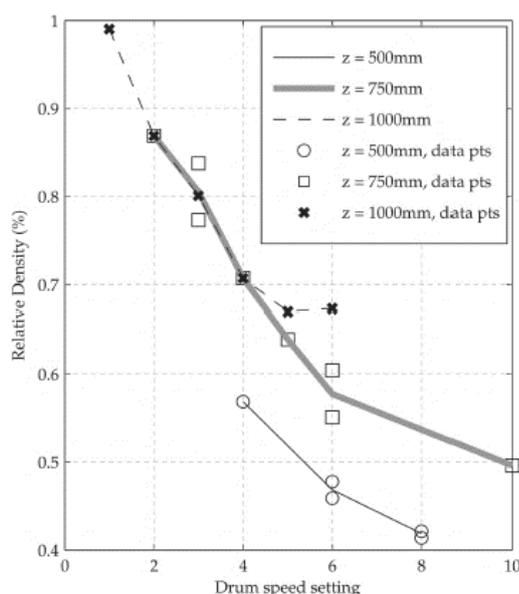


Figura 2.14 – Densidades relativas alcançadas com o novo pluviador em relação à velocidade de rotação do tambor, em mm/s (adaptado de Stringer *et al.*, 2014).

A Universidade de Cambridge também desenvolveu um sistema pluviador para criar modelos em areia com a finalidade de realizar ensaios em centrífugadora e ensaios em 1-g. (Figura 2.15) Este sistema é caracterizado por conter múltiplos peneiros que permitem criar modelos com densidades relativas uniformes. O dispositivo foi desenvolvido para um solo arenoso em que os índices de vazios mínimo e máximo são 0,613 e 1,014, respetivamente, enquanto a densidade das suas partículas possui um valor de 2,65. Nos ensaios de pluviação foram utilizados diferentes recipientes de deposição com diversas formas (circular, retangular e quadrada) de modo a avaliar a sua influência nos valores da densidade relativa (Zhao *et al.*, 2006).

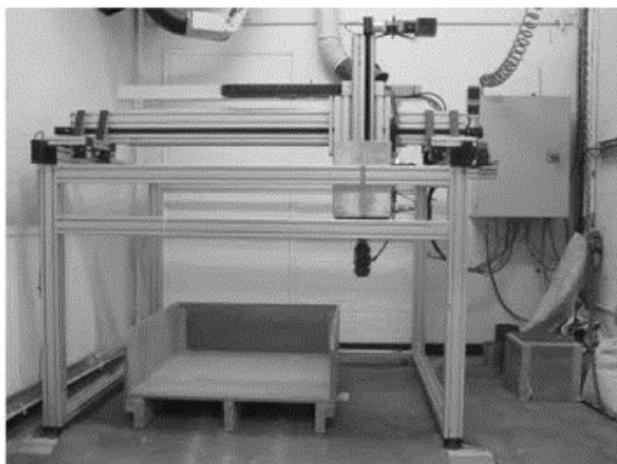


Figura 2.15 – Pluviador automático (adaptado de Zhao *et al.*, 2006).

O sistema de pluviação é constituído por uma tremonha, que no seu fundo possui uma abertura com ligação a um bocal de ligação entre a saída do pluviador e a tremonha, como demonstra a Figura 2.16.

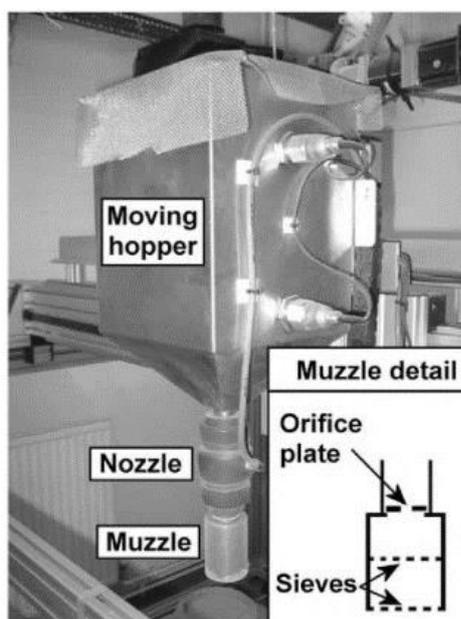


Figura 2.16 – Pormenor do pluviador e do seu respetivo bocal (adaptado de Zhao *et al.*, 2006).

O fluxo de areia a pluviar é controlado entre o bocal e a saída do pluviador, através do tamanho da abertura localizado neste local e que pode ser trocado manualmente. Quando as aberturas do bocal são superiores a 5 mm é possível obter uma distribuição linear entre a abertura do bocal e o fluxo de areia a pluviar, tal como mostra a Figura 2.17.

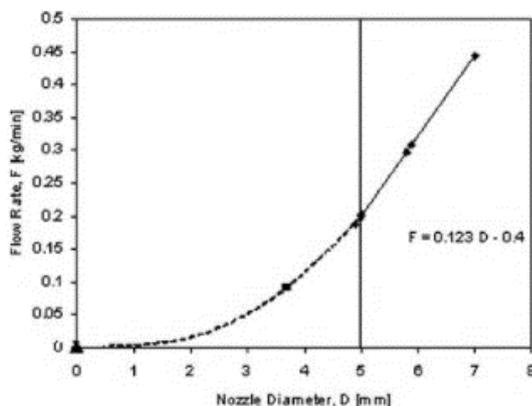


Figura 2.17 – Relação entre o diâmetro da abertura com o fluxo de deposição (adaptado de Zhao *et al.*, 2006).

No interior da saída do pluviador, ou seja, na parte inferior do sistema, encontram-se dois peneiros com uma malha de 0,85 mm e espaçados entre si de 40 mm. Estes peneiros têm a função de espalhamento da areia proveniente da tremonha antes que a mesma entre em fase de queda livre. O pluviador descreve percursos vai-e-vem que se encontram padronizados consoante a forma do molde usado para a deposição da areia pluvada, sendo que todos eles realizam percursos paralelos entre si de 15 mm (Figura 2.18). Outro aspeto é que a altura de queda permanece constante ao longo da pluviação da areia em que estes movimentos são ajustados consoante a quantidade pluvada. Após a finalização de cada ensaio é retirado o excesso do molde cuidadosamente e pesa-se para se obter o valor da massa de areia.

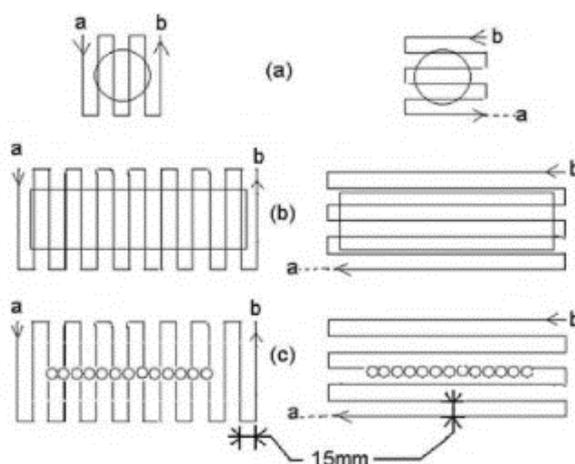


Figura 2.18 – Deslocamentos realizados pelo pluviador (adaptado de Zhao *et al.*, 2006).

Seguidamente, no Quadro 2.3 e na Figura 2.19, encontram-se apresentados alguns resultados das densidades relativas para diferentes fluxos de areia pluviada, para cada tipo de molde usado e para duas alturas de queda consideradas como máxima e mínima (Zhao *et al.*, 2006).

Quadro 2.3 – Valores da densidade relativa obtidos para diferentes fluxos de queda, alturas de queda e forma dos moldes (adaptado de Zhao *et al.*, 2006).

Fluxo de Queda (kg/min)	Altura de Queda (mm)	Densidade Relativa (%)		
		Circular	Retangular	Quadrado
0,091	320	88,2	86,3	82,5
0,091	640	90,9	90,4	84,8
0,202	320	81,6	79,9	74,7
0,202	640	87,8	88,1	81,3
0,444	320	64,9	64,7	58,0
0,444	640	72,5	73,2	65,6

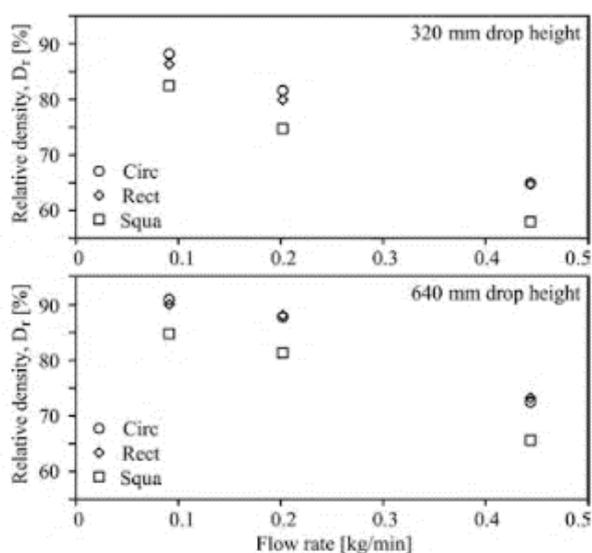


Figura 2.19 – Relação entre a densidade relativa e o fluxo de queda para duas alturas de queda e diferentes tipos de moldes (adaptado de Zhao *et al.*, 2006).

Com a análise do quadro e da figura acima apresentadas pode-se concluir que o fator mais influenciador dos valores da densidade relativa é o fluxo de queda. Para fluxos superiores a 0,45kg/min os peneiros presentes na parte inferior do pluviador começaram a ficar colmatados. Além disso, observa-se que a altura de queda não é muito significativa para a densidade relativa. Contudo, a forma dos moldes já influencia de certa forma os valores obtidos devido aos efeitos de fronteira. Já os valores obtidos com este sistema de pluviação para as densidades relativas situam-se num intervalo entre os 55 e os 90%. (Zhao *et al.*, 2006).

Um último sistema de pluviação que se apresenta encontra-se, atualmente, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Este dispositivo é um sistema de pluviação a seco, por isso designado de “chuveiro de areia” estacionário. O sistema caracteriza-se por ter uma altura de cerca de 2,80 m sendo constituído por um depósito fixo, onde é colocada a areia a ser pluviada, com uma capacidade de 375 litros (Figura 2.20). Na base deste depósito encontra-se uma malha de furos com um diâmetro de 10 mm e uma válvula de regulação de fluxo. Abaixo do depósito encontra-se uma tremonha basculante motorizada, controlada através de ar comprimido, que se desloca automaticamente por cima do recipiente no interior do qual se deposita a areia pluviada. A tremonha desloca-se a uma velocidade constante ao longo do processo de pluviação. Além disso, no interior da tremonha basculante motorizada existe um conjunto de malhas quadradas semelhantes às dos peneiros ASTM. Entre o topo do depósito onde se coloca a areia e a base da tremonha basculante existe uma altura de 1,23 m, sendo esta a altura mínima de queda durante o processo de pluviação (Serra *et al.*, 1997; Portugal, 1998).

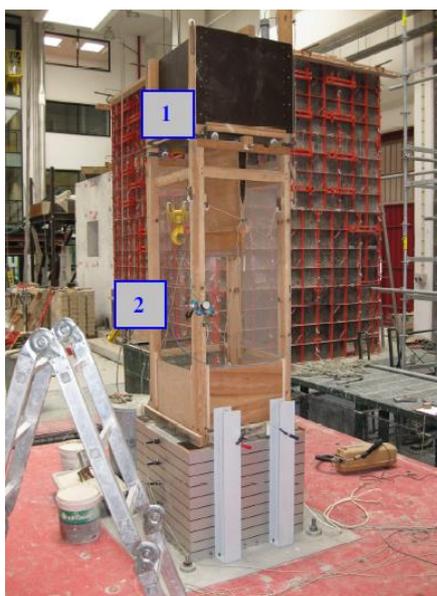


Figura 2.20 – Sistema de pluviação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (1- Depósito; 2-Tremonha basculante motorizada) (adaptado de Gisela, 2012).

Um dos testes realizados com este sistema de pluviação consistiu no preenchimento do recipiente de deposição até à cota de 0,73 m, com um volume de aproximadamente 0,41 m³. O recipiente demorou cerca de cinco dias e ser preenchido em condições controladas, sendo que a altura de queda foi superior a 1 m, tendo variado entre 1,2 m e 2,0 m. Já o fluxo de deposição foi cerca de 5,7x10⁻⁴ m³/min, tentando-se obter a densidade máxima possível para o modelo com um índice de vazios mínimo para a areia de 0,53.

Ao longo do ensaio foi controlada a densidade da areia através de três recipientes calibrados, colocados com um desnível entre si em planta ao longo do recipiente de deposição. Os recipientes foram colocados da seguinte forma: um na base, outro a meia altura do recipiente de deposição e outro no topo com uma cota de 0,70 m. Após o processo de pluviação alguns inconvenientes foram detetados, nomeadamente, a redução do peso volúmico seco quando o processo de pluviação era interrompido e mais tarde retomado e a falta de homogeneidade no modelo obtido. Esta falta de homogeneidade no modelo deve-se essencialmente à travagem da tremonha quando esta fazia a inversão do sentido junto às paredes do sistema. Ainda assim, a densidade obtida durante este ensaio foi de 86%, tendo-se obtido, portanto, um modelo num estado bastante denso (Gisela, 2012).

2.4. Sistemas de pluviação de areia para provetes de grandes dimensões

Além dos sistemas de pluviação para provetes de pequenas dimensões, existem também sistemas de pluviação para a criação de modelos de grandes dimensões. Ao longo dos tempos tem-se observado uma evolução nos sistemas de pluviação, a qual tende a possibilitar um melhor controlo dos aspetos condicionantes da densidade do modelo e de automatização desses mesmos sistemas, de maneira a que a influência do operador seja limitada e de forma a reduzir o seu efeito nos resultados obtidos nos ensaios de pluviação.

Em 2012, Dave & Dasaka desenvolveram um sistema de pluviação para a preparação de modelos de areia designado de *Portable Travelling Pluviator* (PTP), que se baseia numa pluviação aérea de modo a obter modelos com densidades uniformes ao longo da altura e repetíveis ao longo dos ensaios. Segundo os autores, este método de pluviação deve atender a diversos critérios, nomeadamente, ser capaz de produzir modelos com um extenso intervalo de compactação de modo a obter modelos desde bastante soltos a muito densos, ser possível obter um índice de vazios constante ao longo do modelo de modo a garantir a densidade constante ao longo do mesmo, a mistura do solo arenoso sem ocorrer segregação das partículas independentemente da granulometria da areia ou até mesmo do teor de finos e, por último, ser possível a simulação do solo encontrado *in situ* através de condições controladas (Dave & Dasaka, 2012).

O sistema de pluviação desenvolvido consiste numa tremonha fixa com uma capacidade para 50 kg de solo, que é ligada a um tubo rígido com 60 cm de comprimento por meio de um tubo flexível de comprimento variável, consoante a altura pretendida entre o tubo rígido e a tremonha. O uso do tubo flexível tem por objetivo facilitar a movimentação manual do tubo rígido ao longo do depósito onde se pretende criar o modelo; já a utilização do tubo rígido

permite que a areia a ser pluvizada caia uniformemente no conjunto de peneiros existentes no seu interior. Este conjunto de peneiros, mais especificamente composto por 10 peneiros, tem o objetivo de espalhar as partículas de areia que irão ser pluvizadas de modo a criar uma pluviação uniforme. Os 10 peneiros não são colocados todos de igual forma: os três primeiros peneiros encontram-se espaçados de 6 mm entre si, enquanto os restantes possuem um espaçamento de 10 mm. Além disso, estes peneiros encontram-se rodados horizontalmente entre si 45°, de forma a se conseguir uniformidade na pluviação, evitar a colmatação e garantir a continuidade sem paragens do processo de pluviação (Figura 2.21) (Dave & Dasaka, 2012).

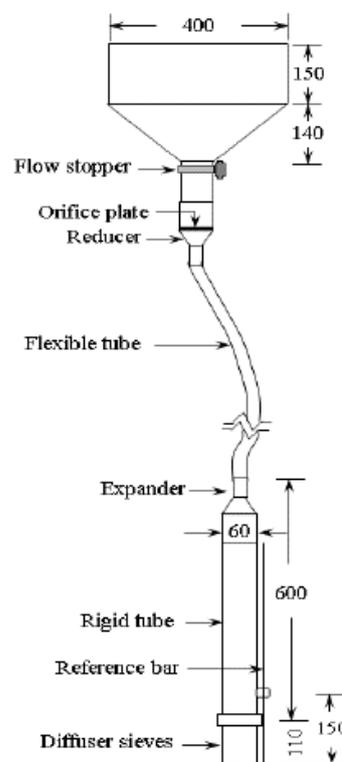


Figura 2.21 – Sistema de pluviação PTP (adaptado de Gade *et al.*, 2015)

O processo de pluviação é realizado de acordo com os padrões de deslocamentos realizados por Zhao *et al.* (2006), através da deposição de camadas finas e com o levantamento gradual do tubo rígido para ser possível manter a altura de queda constante. A altura de queda foi mantida constante com recurso a uma barra de referência ligada ao tubo rígido onde apenas a sua ponta tocava a superfície do modelo. Para o controlo do fluxo de queda, o sistema de pluviação possui na parte inferior da tremonha um local onde é permitido colocar uma placa perfurada com aberturas circulares, com diâmetro que pode variar de 4 a 10 mm, de modo a regular o fluxo.

Os testes com este tipo de sistema de pluviação foram realizados com uma areia padrão proveniente da Índia, que é classificada como uma areia média a fina e que possui índices de vazios mínimo de 0,538 e máximo de 0,848. Para a realização dos testes recorreu-se a um molde cilíndrico com um volume de 3250 cm³.

Os testes realizados consistiram na variação da altura de queda, realizando-se ensaios com alturas a variar dos 2,5 cm aos 30 cm, numa variação do fluxo de queda em que foram utilizadas as placas perfuradas de 5, 6, 8, 10 e 12 mm, e ainda variando o número de peneiros usados no tubo rígido. No Quadro 2.4 é apresentada a intensidade de deposição para a areia em estudo consoante a abertura das placas perfuradas, onde, como não podia deixar de ser, com o aumento da abertura há um aumento do fluxo de deposição (Gade et al., 2015).

Quadro 2.4 – Efeito do tamanho da abertura dos furos na intensidade de deposição (adaptado de Gade et al., 2015).

Tamanho da abertura dos furos (mm)	Intensidade de Deposição (g/cm ² /s)
5	0,468
6	0,584
8	1,857
10	3,69
12	4,832
15	11,529

Além disso, através da Figura 2.22 é perceptível que com o aumento da abertura se obtiveram valores para a densidade mais baixos, assim como um aumento da densidade relativa com alturas de queda crescentes. Outro ponto importante é que com o aumento da altura de queda, a influência da abertura é cada vez mais insignificante perante o valor da densidade relativa.

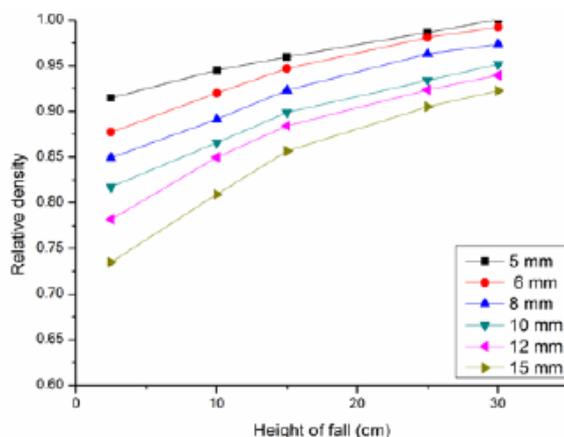
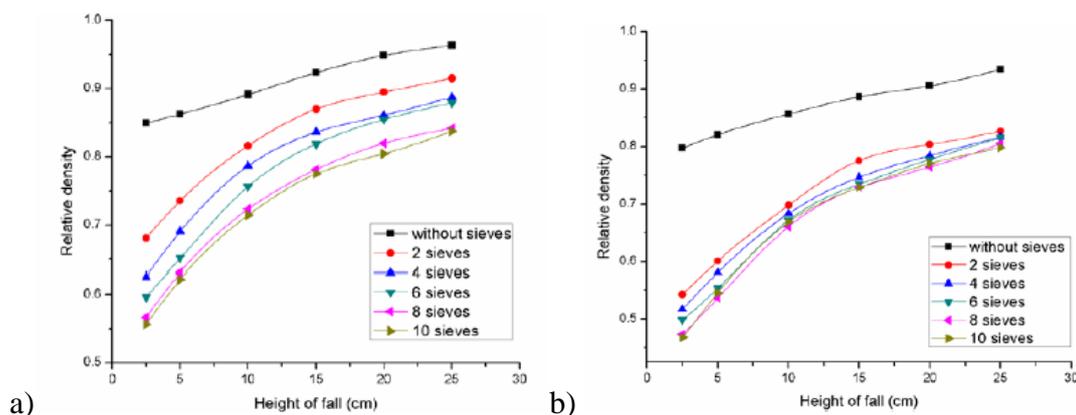
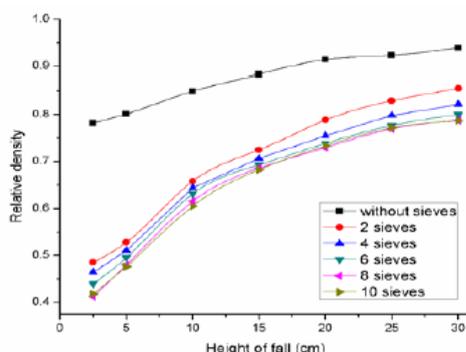


Figura 2.22 – Relação entre a altura de queda e densidade relativa para as diferentes aberturas (adaptado de Gade et al., 2015).

Seguidamente são apresentadas três figuras relacionando a altura de queda com a densidade relativa para os diferentes números de peneiros utilizados no tubo rígido (Figura 2.23). As três figuras representam uma placa perfurada com furos de 8 mm, 10 mm e 12 mm, respetivamente. Analisando todos eles, concluímos que a obtenção de valores altos para a densidade relativa é feita sem o uso de qualquer peneiro no tubo rígido, seja qual for a abertura dos furos da placa perfurada. Outro aspeto importante trata-se do facto da diferença dos valores alcançados para a densidade relativa diminuir com o aumento do número de peneiros, ou seja, existe uma diferença maior dos valores da densidade entre a utilização de 2 e 4 peneiros do que a utilização de 4 e 6 peneiros, e assim sucessivamente. Em jeito de conclusão, podemos retirar o facto de a densidade relativa aumentar com o aumento da altura de queda, uma diminuição da abertura dos furos da placa perfurada e uma diminuição no número de peneiros utilizados.





c)

Figura 2.23 – Influência do número de peneiros e da altura de queda com a densidade relativa para uma abertura de 8 (a)), 10 (b)) e 12 mm (c)) (adaptado de Gade et al., 2015).

Este sistema de pluviação permite obter uma gama de valores para a densidade relativa muito vasta, visto os valores atingidos variarem entre 41% a 100% (Gade *et al.*, 2015).

Nos dias de hoje, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil possui um sistema de pluviação para criação de modelos de areia com vista a serem ensaiados em mesa vibratória. Este sistema de pluviação é o sistema onde este projeto mais se baseia face às semelhanças do pluviador que se pretende conceber. O dimensionamento deste sistema por parte do LNEC foi concebido para a criação de modelos compactos a muito compactos (densidade entre os 70 a 85%), sempre garantindo a homogeneidade do modelo em termos de densidade quer em altura quer em planta e permitindo a repetibilidade do processo de pluviação.

O pluviador desenvolvido possui o método de deposição gravítica para o enchimento do contentor do modelo que possui 2 m de comprimento, 0,75 m de largura e uma altura de 1,75 m. Este sistema de pluviação possui diversas características, entre as quais permitir a execução do modelo por fases para que possa ser instalada a instrumentação para os ensaios em mesa vibratória e a variação na compactação do modelo ao longo da altura de modo a simular os maciços de solo arenosos que se encontram *in situ*. Outra característica que torna vantajoso este tipo de sistema é o facto de não haver influência humana durante o processo de pluviação.

Como em todos os pluviadores, existe uma gama determinada de solos para os quais estes são dimensionados, sendo que este sistema foi concebido para uma areia siltosa branca designada de *Silbeco SP-49*. Esta areia tem um índice de vazios mínimo de 0,516 enquanto o seu valor máximo é de 0,889.

O pluviador consiste numa estrutura de aço (Figura 2.24) que possui na sua parte superior um depósito fixo onde é colocado o solo arenoso antes da pluviação. Sobre a estrutura de aço e por

baixo do depósito fixo, encontram-se dois carris sobre os quais se desloca um pequeno contentor com 77 dm³ de capacidade. O deslocamento deste pequeno contentor é feito através de um motor de engrenagem controlado por um controlador eletrónico de velocidade, de modo a ser possível alterar o valor da sua velocidade de deslocamento consoante o pretendido. Antes do início do processo de pluviação, o contentor é preenchido quando se encontra estacionado sobre o depósito fixo, sendo este último preenchido com sacos de areia de 500 kg suspensos através de uma ponte rolante. Após o enchimento do contentor dá-se início ao processo de pluviação com o contentor a descrever um deslocamento horizontal, delimitado através de sensores colocados nos extremos do percurso (Oliveira et al., 2012).

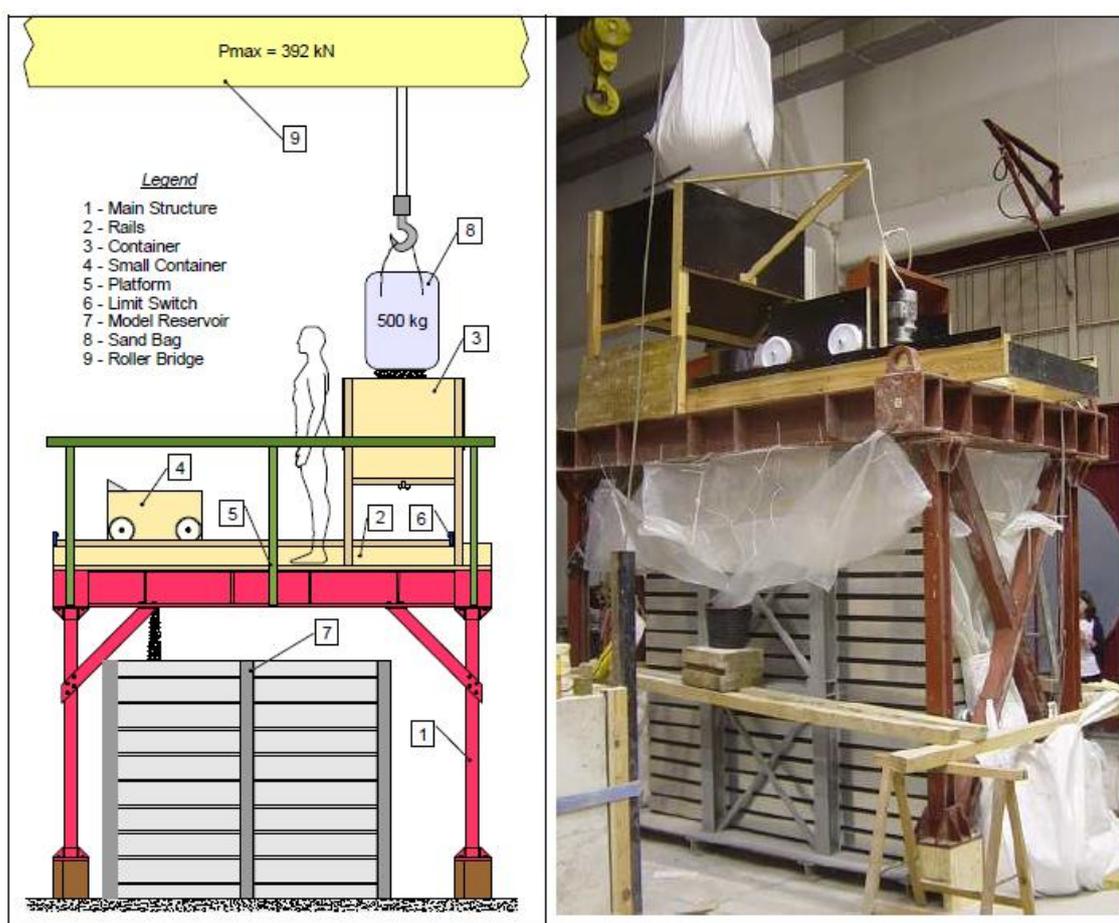


Figura 2.24 – Esquema representativo do sistema de pluviação (lado esquerdo) e fotografia do sistema de pluviação presente no LNEC (lado direito) (adaptado de Oliveira *et al.*, 2012).

Este sistema realiza o seu processo de deposição em cortina, onde o fluxo é controlado através da abertura que se encontra na parte inferior do contentor móvel. Já o enchimento do contentor móvel é realizado através de um técnico que controla todo o processo de pluviação. Este

pluviador é caracterizado por ter uma altura máxima de queda de 2,80 m, enquanto que a área de deposição é de 0,77 x 2,20 m². Além disso, é possível variar o fluxo de queda entre 586 g/s e 1367 g/s, consoante a abertura inserida na parte inferior do contentor móvel, e variar a velocidade de deslocamento do contentor entre 4 cm/s e 14 cm/s (Oliveira et al., 2012)

Numa fase prévia à realização dos ensaios de pluviação, foi avaliada a relação entre o fluxo de queda e o tamanho da abertura inferior do contentor móvel. Para isso foi utilizado um dispositivo com uma abertura semelhante ao que se podia encontrar no pluviador e através da sua variação em termos de abertura retirou-se o valor dos fluxos de queda. Os valores obtidos encontram-se relacionados na Figura 2.25, onde não existe uma relação linear entre os mesmos. Além disso, observa-se que abaixo dos 4 mm de abertura o fluxo torna-se irregular devido à colmatação por parte das partículas de areia na abertura.

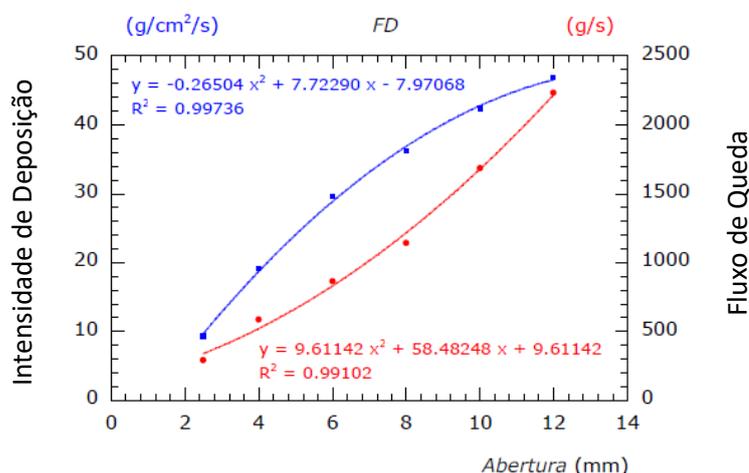


Figura 2.25 – Efeito da abertura no fluxo de queda (adaptado de Oliveira et al., 2012).

Seguidamente, realizaram-se os primeiros ensaios para verificar a influência dos parâmetros controláveis bem como para tentar identificar a altura de queda crítica da areia em estudo, pelo que foram utilizados três moldes Proctor, os quais foram posicionados em diferentes níveis de altura dentro do recipiente de deposição do modelo. O primeiro ensaio teve como objetivo analisar a densidade obtida para uma abertura do pluviador constante, de 5 mm, fazendo variar a velocidade de deslocamento com valores de 6, 8 e 10 cm/s (Figura 2.26). Num segundo ensaio, foi mantida constante a velocidade de deslocamento, de 10 cm/s, variando apenas o tamanho da abertura em 4, 5 e 6 mm (Figura 2.27).

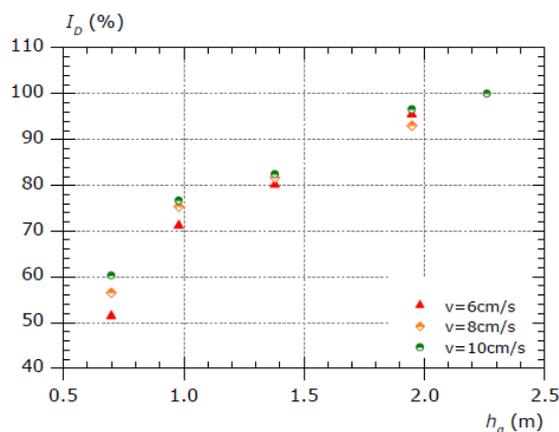


Figura 2.26 – Influência da altura de queda para as diferentes velocidades na densidade relativa (adaptado de Carvalho, 2012).

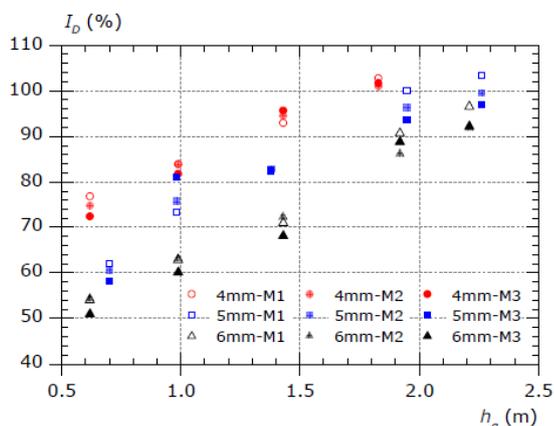


Figura 2.27 – Influência da altura de queda para as diferentes aberturas nos diferentes moldes na densidade relativa (adaptado de Carvalho, 2012).

Com a análise da Figura 2.26 rapidamente se conclui que um aumento da altura de queda e um aumento da velocidade, embora este último seja pouco significativo, conduz ao aumento da densidade relativa. Já na observação da Figura 2.27 verifica-se que menores aberturas do pluviador conduzem certamente a menores fluxos de queda, o que se traduz num aumento da densidade relativa, particularmente para alturas de queda mais baixas.

Em forma de conclusão, os resultados obtidos para este pluviador aéreo de areia seca não permitiram determinar a altura de queda crítica, ficando apenas a noção de que esta será superior a 1,5 m. Além disso, verificou-se que a velocidade de deslocamento do contentor móvel tem pouca influência nos valores da densidade relativa. Os valores da densidade relativa alcançados com este sistema variam entre 50 e 100%, pelo que o sistema é capaz de reproduzir modelos medianamente compactos a bastante densos (Carvalho, 2012).

3. ENSAIOS LABORATORIAIS PREPARATÓRIOS

3.1. Considerações iniciais

O desenvolvimento de um sistema de pluviação tem como base a granulometria de um solo arenoso para o qual irá ser dimensionado. A escolha da areia é essencial para ser possível o desenvolvimento do sistema adaptado à granulometria desta areia.

A areia escolhida provém da zona da praia de Mira, distrito de Coimbra, e possui uma cor bastante clara, aproximando-se da cor bege. A forma dos grãos desta areia é arredondada e o seu fuso granulométrico bastante reduzido, podendo classificar-se como uma areia média.

Neste capítulo são apresentados os ensaios realizados tendo em vista a caracterização desta areia tais como a curva granulométrica, a determinação da densidade das partículas e os índices de vazios máximo e mínimo.

3.2. Caracterização granulométrica da areia

Na caracterização da areia começou-se por realizar a análise granulométrica, que se trata da distribuição das partículas da areia, em percentagens em relação à sua massa total, consoante as suas dimensões. Para o efeito foi utilizado o método da peneiração, o qual consiste em fazer passar o material por peneiros com abertura sucessivamente menor, sendo depois pesadas as frações retidas nos diversos peneiros. A análise granulométrica tem como objetivo obter uma curva que relaciona a abertura dos diversos peneiros com a percentagem de partículas passadas em cada um dos peneiros.

Neste processo foi utilizada a metodologia da peneiração por via seca seguindo a norma E 196-1966, tendo-se utilizado peneiros de malha quadrada com as seguintes aberturas (mm): 6,3; 4,75; 2; 0,85; 0,425; 0,25; 0,15; 0,075.

Numa primeira fase mediu-se a massa total da areia que seria peneirada, realizando-se seguidamente a peneiração com a aplicação de uma ligeira vibração aos peneiros. A pesagem das frações retidas nos diversos peneiros e no depósito (de material passado no peneiro 0,075 mm) foi efetuada numa balança com a precisão de 0,001 g.

No total foram realizados ensaios em quatro amostras, cuja massa inicial variou entre 121 g e 197 g, aproximadamente, estando as respetivas curvas granulométricas representadas na Figura 3.1. Nesta figura é evidente a sobreposição das quatro curvas granulométricas, o que indicia uma homogeneidade na granulometria e nos procedimentos dos ensaios realizados sobre as quatro amostras. Também é evidente que a areia apresenta um fuso granulométrico muito estreito e com partículas de pequena dimensão. A variedade das dimensões das partículas da areia pode ser dada pelo coeficiente de uniformidade, $C_u = 2,15$, enquanto que a forma da curva granulométrica é dada pelo coeficiente de curvatura, $C_c = 0,98$. Com ambos os coeficientes obtidos, pode-se classificar a areia como uma areia mal graduada.

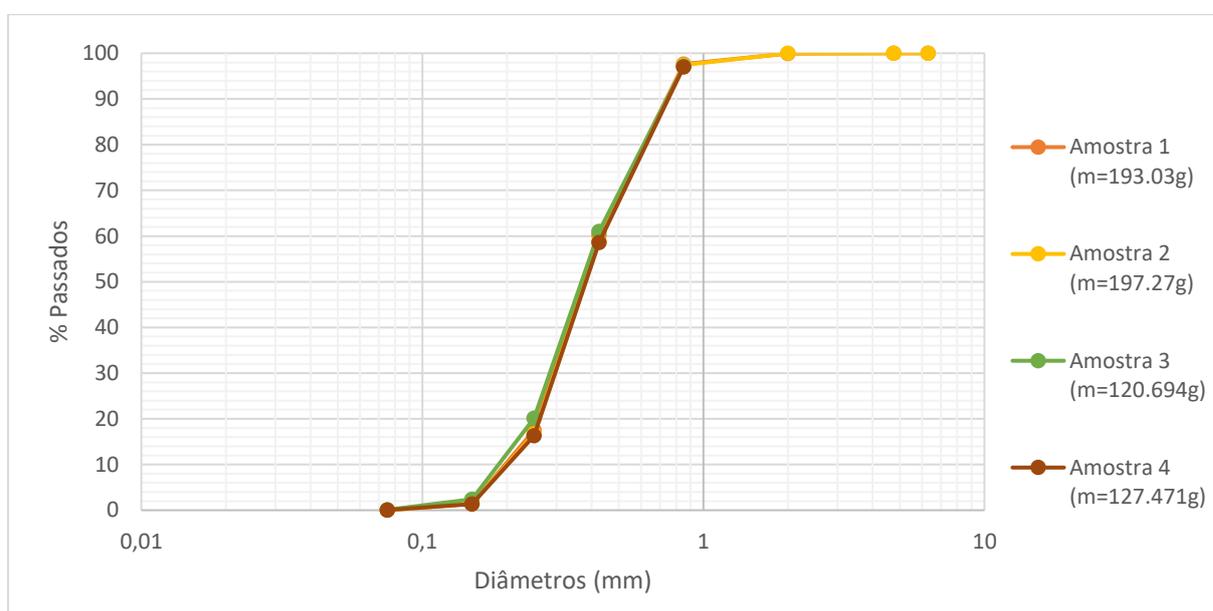


Figura 3.1 – Curvas Granulométricas da areia em estudo

3.3. Densidade das partículas sólidas

A determinação da densidade das partículas sólidas é necessária para o cálculo dos índices de vazios, particularmente dos seus valores máximo e mínimo, fundamentais para o cálculo das densidades relativas da areia. Deste modo, apesar de se saber que este é um parâmetro com uma gama de valores muito restrita, procedeu-se à sua determinação de forma a garantir um cálculo rigoroso dos valores dos índices de vazios.

Os ensaios para determinação da densidade das partículas sólidas, G , seguiram o estipulado na norma NP-83 1965. Para o efeito foram utilizadas quatro amostras e o mesmo número de picnómetros (Figura 3.2), tendo-se obtido os valores representados no Quadro 3.1.

É possível observar que o ensaio com o picnómetro 95 apresenta um desvio padrão elevado, cerca de 0,71, relativamente aos restantes resultados, pelo que se considerou conveniente eliminar este ensaio na média dos resultados obtendo-se, assim, um valor da densidade das partículas sólidas de 2,6598.

Quadro 3.1 – Resultados da densidade das partículas sólidas.

Número Picnómetro	85	91	95	96
G	2,6604	2,6573	2,6851	2,6618



Figura 3.2 – Picnómetros usados nos ensaios.

No decorrer do processo para o cálculo da densidade das partículas de areia através da norma NP-83 1965, houve necessidade de realizar adaptações ao procedimento da mesma. Segundo a norma anteriormente referida, os picnómetros devem ser preenchidos com uma massa de areia previamente pesada de 25 g, porém, foi pesada uma massa de areia de 28 g para precaver eventuais perdas que possam ocorrer na passagem da cápsula com areia para cada picnómetro. Além disso, a norma indica que a massa de areia dentro de cada picnómetro deva ficar a saturar durante 12 horas, contudo as amostras de areia contida nos quatro picnómetros foram deixadas durante 24 horas.

3.4. Índices de vazios de referência

A determinação dos índices de vazios máximo e mínimo, correspondentes à baridade mínima e máxima da areia respetivamente, são fundamentais para o cálculo das densidades relativas obtidas nos testes de pluviação e para a calibração do sistema de pluviação desenvolvido. Os valores destes índices de vazios, dependentes do arranjo das partículas de areia, são função não

apenas de fatores relacionados com a deposição das partículas, mas também da sua forma e tamanho. Na Secção 2.2 foram já apresentados detalhadamente esses fatores e a forma como podem influenciar a densidade relativa. Os procedimentos e resultados dos índices de vazios máximo e mínimo para a areia de Mira são descritos nas secções seguintes.

3.4.1. Índice de vazios máximo (e_{max})

Para a determinação do índice de vazios máximo da areia foram seguidos os procedimentos do Método C descrito na norma ASTM D4254, relativa à determinação experimental da baridade seca mínima, com adaptações ao equipamento disponível no Laboratório de Geotecnia da FCTUC. Com efeito, segundo este método deveriam ser utilizadas 1000 g de solo sujeitas a agitação manual numa proveta com volume de 2000 mL. Como apenas se dispunha de uma proveta de 1000 mL, pelo que se utilizou uma quantidade proporcionalmente reduzida de 500 g de material.

O método utilizado consiste em agitar a proveta com a quantidade de areia referida, como se ilustra na Figura 3.3, ao longo de 10 segundos e registar os novos valores, de massa e volume após essa agitação. Este método implica perdas de massa ao longo da agitação pois esta era realizada com recurso à palma da mão para tapar a abertura da proveta, tendo-se verificado, porém, que este método permitia obter valores bastante semelhantes para a mesma quantidade aproximada de material. Após a agitação da areia a proveta foi cuidadosamente colocada na posição vertical e efetuaram-se as leituras finais. A massa do material contido na proveta foi medida com recurso a uma balança com precisão de 0,01 g e a leitura do volume a olho nu na escala graduada da proveta (Figura 3.4). O processo foi repetido por diversas vezes até se obter uma série de resultados consistentes.



Figura 3.3 – Agitação da proveta durante um ensaio.



Figura 3.4 – Leitura do volume final a olho nu.

O cálculo de $e_{m\acute{a}x}$ foi efetuado com recurso à Equação 2, utilizando um valor para o peso volúmico da água de $9,81 \text{ kN/m}^3$ e o valor do peso volúmico seco mínimo através do quociente entre a massa e o volume da amostra no final de cada ensaio. Os resultados dos sete ensaios estão representados no Quadro 3.2, onde se eliminou o resultado com desvio em relação ao valor médio superior a 1% (4º ensaio), tendo-se assim obtido um valor de $e_{m\acute{a}x}=0,70$. Segundo a norma ASTM D4254, é necessário apenas a realização de três ensaios com valores consistentes tendo-se, porém, realizado sete para melhor despistar quaisquer erros.

Quadro 3.2 – Resultados dos ensaios.

	m (g)	m (kN)	V (l)	V (m ³)	γ (kN/m ³)	e
1º Ensaio	499,8	4,9030	0,32	0,00032	15,3220	0,7030
2º Ensaio	499,8	4,9030	0,32	0,00032	15,3220	0,7030
3º Ensaio	499,7	4,9021	0,32	0,00032	15,3189	0,7033
4º Ensaio	499,7	4,9021	0,33	0,00033	14,8547	0,7566
5º Ensaio	499,6	4,9011	0,32	0,00032	15,3159	0,7037
6º Ensaio	499,6	4,9011	0,32	0,00032	15,3159	0,7037
7º Ensaio	499,5	4,9001	0,32	0,00032	15,3128	0,7040
Valor Médio						0,7034
Valor Desvio Padrão						0,00038

3.4.2. Índice de vazios mínimo (e_{min})

Para a obtenção do índice de vazios mínimo foi seguida a norma ASTM D4253, segundo o Método 2A para amostras secas, referente à determinação experimental da baridade seca máxima. Contudo, também aqui teve-se de adaptar os procedimentos da norma ao equipamento disponível no laboratório, nomeadamente quanto à mesa vibratória, que não terá a mesma frequência padronizada estipulada na norma e não dispunha de sistema de fixação do molde, às dimensões aproximadas do molde utilizado e ao peso colocado sobre a amostra a densificar.

O molde utilizado tem a forma cilíndrica, com altura de 11,70 cm e diâmetro de 10,18 cm, ao qual corresponde um volume total de $9,52E-4 \text{ m}^3$. As dimensões dos moldes padronizados pela norma possuem forma cilíndrica e as suas dimensões são de 15,1 cm de diâmetro com 15 cm de altura, o que corresponde a um volume de $2,83E-3 \text{ m}^3$, e 27,6 cm de diâmetro e 23 cm de altura correspondente a um volume de $1,42E-2 \text{ m}^3$. Atendendo a que a área da base é de $8,13E-3 \text{ m}^2$ e que o peso da placa colocada sobre a amostra é de 9653,1 g, a tensão aplicada no topo da amostra foi de 11,65 kPa. Por sua vez, o valor desta tensão estipulada pela norma é de 13,8 kPa. No entanto, apesar dos desvios em relação à norma, julga-se que o resultado final não seria significativamente diferente do obtido se fosse utilizado o equipamento estipulado por esta.



Figura 3.5 – Colocação de uma camada de areia dentro do provete.

Com base em investigações realizadas anteriormente por Santos (2009), para a areia de Coimbra, o valor mais baixo obtido para o índice de vazios foi conseguido com o enchimento do molde em sete camadas, sendo que se fazia a vibração após a inserção de cada camada (Figura 3.5). Neste estudo, decidiu-se utilizar o mesmo procedimento, embora sabendo que a areia neste caso era diferente da utilizada na investigação anteriormente referida. O procedimento inicia-se com a divisão do volume total do molde em sete partes, onde cada uma corresponde a uma camada, tendo-se obtido um valor de 0,136 L por camada. Nos ensaios não

foi usado rigorosamente o valor obtido para cada uma das sete camadas, mas sim um volume um pouco maior, entre 0,160 e 0,180 L nas primeiras seis camadas e cerca de 0,140 L na sétima, isto para que se garantisse que o molde estaria preenchido no final de todas as camadas inseridas.

A densificação de cada camada foi conseguida através de vibração sobre a mesa vibratória, com o peso sobre a amostra, durante um período 60 segundos. O processo foi idêntico nas sete camadas havendo, no entanto, a necessidade de utilizar a extensão do molde quando colocado o material a partir da quarta/quinta camada para garantir a estabilidade do peso durante a vibração.

Após a pesagem do molde preenchido com areia densificada e por subtração do peso do molde vazio foi possível determinar a baridade seca máxima obtida em cada ensaio. Os valores obtidos nos dez ensaios realizados encontram-se no Quadro 3.3, tendo-se excluído aqueles que apresentaram uma variação superior a 1% em relação ao valor médio (resultados com sublinhado a vermelho no Quadro 3.3). Deste modo, apenas foram utilizados os resultados de sete ensaios, o que corresponde a um valor médio do índice de vazios mínimo $e_{\min}=0,44$.

Quadro 3.3 – Resultados dos ensaios.

	Peso do Molde c/ Areia		Peso da Areia		Y	e
	g	kN	g	kN	kN/m ³	
Ensaio 1	5628,6	55,2166	1739,9	17,0684	17,94	<u>0,4542</u>
Ensaio 2	5662,6	55,5501	1773,9	17,4020	18,29	0,4263
Ensaio 3	5654,6	55,4716	1765,9	17,3235	18,21	0,4327
Ensaio 4	5648,8	55,4147	1760,1	17,2666	18,15	0,4375
Ensaio 5	5640,4	55,3323	1751,7	17,1842	18,07	0,4444
Ensaio 6	5678,3	55,7041	1789,6	17,5560	18,46	<u>0,4138</u>
Ensaio 7	5643,5	55,3627	1754,8	17,2146	18,10	0,4418
Ensaio 8	5657,8	55,5030	1769,1	17,3549	18,24	0,4302
Ensaio 9	5670,8	55,6305	1782,1	17,4824	18,38	<u>0,4197</u>
Ensaio 10	5638,2	55,3107	1749,5	17,1626	18,04	0,4462
Valor médio						0,4370
Valor Desvio Padrão						0,006985

4. DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO À ESCALA REDUZIDA

4.1. Considerações iniciais

Antes da elaboração de um projeto a grande escala, torna-se necessário realizar esboços tendo em vista a criação de modelos conceptuais à escala reduzida de forma a perceber qual será a melhor maneira de se conceber o projeto e se estes modelos têm capacidade de cumprir os objetivos esperados, ainda que com as suas limitações. Neste caso de estudo, foi então realizado um modelo à escala reduzida tendo sido necessário a passagem por várias fases de elaboração, várias ideias em relação ao modelo a ser realizado, até chegar ao modelo final em escala reduzida.

Os objetivos da construção deste modelo são: perceber o funcionamento do mesmo e verificar se este é viável para o projeto, bem como resolver eventuais problemas que pudessem surgir durante a sua utilização. Ainda assim, a concepção deste modelo é essencial para o ganho de sensibilidade em relação aos valores obtidos com a finalidade de relacionar os mesmos com os valores que serão obtidos posteriormente com um sistema de grandes dimensões.

O principal fator a ter em consideração na elaboração deste modelo reduzido foi a realização de um modelo em que o processo de pluviação fosse realizado em forma de “cortina”, à semelhança ao modelo de grandes dimensões que se pretende construir posteriormente, e ainda evitar de ocorrências de segregação ou de colmatação por parte das partículas de areia na abertura do modelo de forma que não fosse dificultado o processo de pluviação ou que este não conduzisse a erros nos resultados.

4.2. Desenvolvimento do modelo

O desenvolvimento de um modelo à escala reduzida para o sistema de pluviação não foi, numa primeira fase, nem fácil nem linear, isto porque foi preciso perceber se a sua construção era realmente a mais adequada, e como seria construído esse modelo. Inicialmente, a ideia era basear o modelo num já anteriormente descrito (Oliveira *et al.*, 2012), existente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Esta ideia pareceu a mais adequada pelo que se realizou um pequeno esboço do que seria o modelo (Figura 4.1). Este esboço foi realizado apenas para o depósito do modelo, pois seria a parte mais importante de reproduzir, tudo o resto era facilmente acrescentado. Neste esboço o depósito consistia em quatro paredes, todas elas com uma inclinação pré-definida de 35°, sendo este o valor mínimo do intervalo dos valores comuns para

o ângulo de atrito das areias, e uma abertura na sua base de 5 mm de abertura e 60 cm de comprimento. Porém, este tipo de modelo tinha alguns inconvenientes, sendo um deles devido à construção das faces laterais, o que dificultaria a união das mesmas com a inclinação controlada. Outro inconveniente tinha a ver com o controlo da abertura, visto que neste estudo era necessário que o modelo tivesse abertura controlada e ajustável para ser possível realizar ensaios com diferentes fluxos de queda.

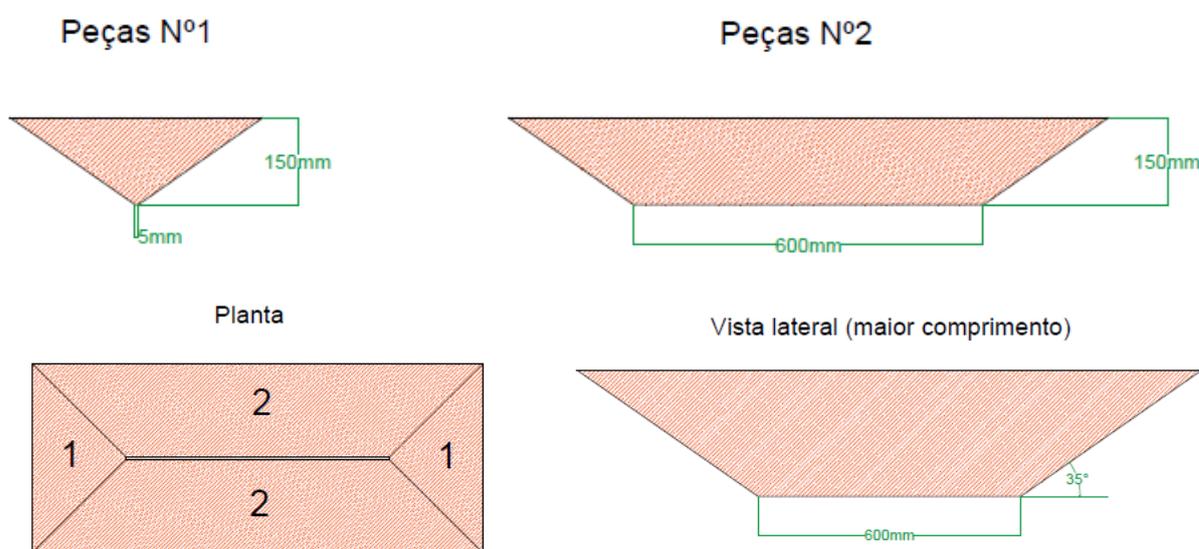


Figura 4.1 – Esboço da primeira ideia do modelo reduzido.

Seguidamente, refletiu-se e decidiu-se colocar não quatro faces inclinadas, mas apenas duas (faces ao longo do comprimento) com uma determinada inclinação, sendo que as outras duas (faces laterais) ficariam totalmente verticais. Assim sendo, foi criado um modelo em cartão com as mesmas medidas do esboço anterior, para perceber se realmente seriam adequadas as dimensões do respetivo depósito do modelo (Figura 4.2). Ainda que o inconveniente em relação às faces laterais estivesse devidamente ultrapassado, visto a sua execução e reprodução ser muito mais fácil, o sistema de controlo de abertura continuava a ser uma preocupação, pelo que uma ideia que surgiu foi a elaboração de várias faixas metálicas perfuradas, com furos de diferentes aberturas, que seriam colocadas na base do modelo com um sistema em que seria possível a sua troca em função do fluxo de queda pretendido. Todavia, a perfuração de faixas deste tipo não seria de fácil execução, daí ter sido posta de parte esta ideia.



Figura 4.2 – Maquete em cartão do modelo reduzido a desenvolver.

O modelo final à escala reduzida desenvolvido possui semelhanças com os esboços e modelos anteriormente referidos, contudo com uma elaboração mais prática e mais eficiente. Este modelo é constituído por um depósito no qual na sua base possui uma ranhura/rasgo que pode ser ajustado consoante a abertura pretendida. O depósito deste modelo possui duas faces laterais verticais com o objetivo de simplificar a construção do mesmo, sendo que num modelo futuro se podem usar faces com a inclinação controlada. Isto é o que acontece nos dois lados de maior comprimento, em que são utilizadas duas faces inclinadas com uma inclinação fixa de cerca de 45° . Como o valor do ângulo de resistência ao corte das areias varia habitualmente entre 30° e 45° , optou-se pelo valor máximo desse intervalo até para evitar eventuais problemas de segregação das partículas de areia. Em relação às faces longitudinais (inclinadas), estas podem ser ajustadas, subindo ou descendo consoante a abertura pretendida, através da afinação de parafusos que se encontram na parte exterior do modelo e que as fixam na posição desejada. De forma a limitar as deformações devido ao peso suportado quando o depósito estivesse preenchido de areia e para manter uniforme a largura da ranhura em toda a sua extensão, foram colocadas ripas de madeira nas placas longitudinais que, no entanto, limitam a abertura máxima da ranhura. Além disso, este modelo possui um sistema basculante de abertura e de fecho na ranhura do depósito através de uma alavanca que se encontra na sua parte exterior. Este sistema possui uma chapa metálica côncava que permite que se preencha o depósito de areia antes da realização de um ensaio e que, posteriormente, seja possível controlar o tempo de queda desse mesmo ensaio. A chapa metálica referida foi forrada por um material plástico com um comportamento deformável de modo a vedar a ranhura da base do depósito. Abaixo deste sistema de abertura foi colocada uma rede com uma malha aproximada de 2 mm com o efeito

de espalhamento das partículas de areia aquando a realização da pluviação, todavia esta rede era amovível. Já na parte mais inferior do modelo foram colocadas quatro rodas unidireccionais para que fosse possível o seu deslizamento ao longo de carris. Entre as duas rodas de cada um dos lados foi colocada uma folha de papel para evitar que as partículas de areia ressaltassem e caíssem nos carris durante o processo de pluviação, o que prejudicaria a uniformidade do movimento de translação do pluviador. Seguidamente, nas Figuras 4.3 a 4.6 encontra-se um protótipo do modelo reduzido com as suas dimensões e na Figura 4.7 é possível observar como é realizada a pluviação através deste modelo, em que a mesma é feita em forma de cortina uniforme ao longo de toda a ranhura da base do depósito.

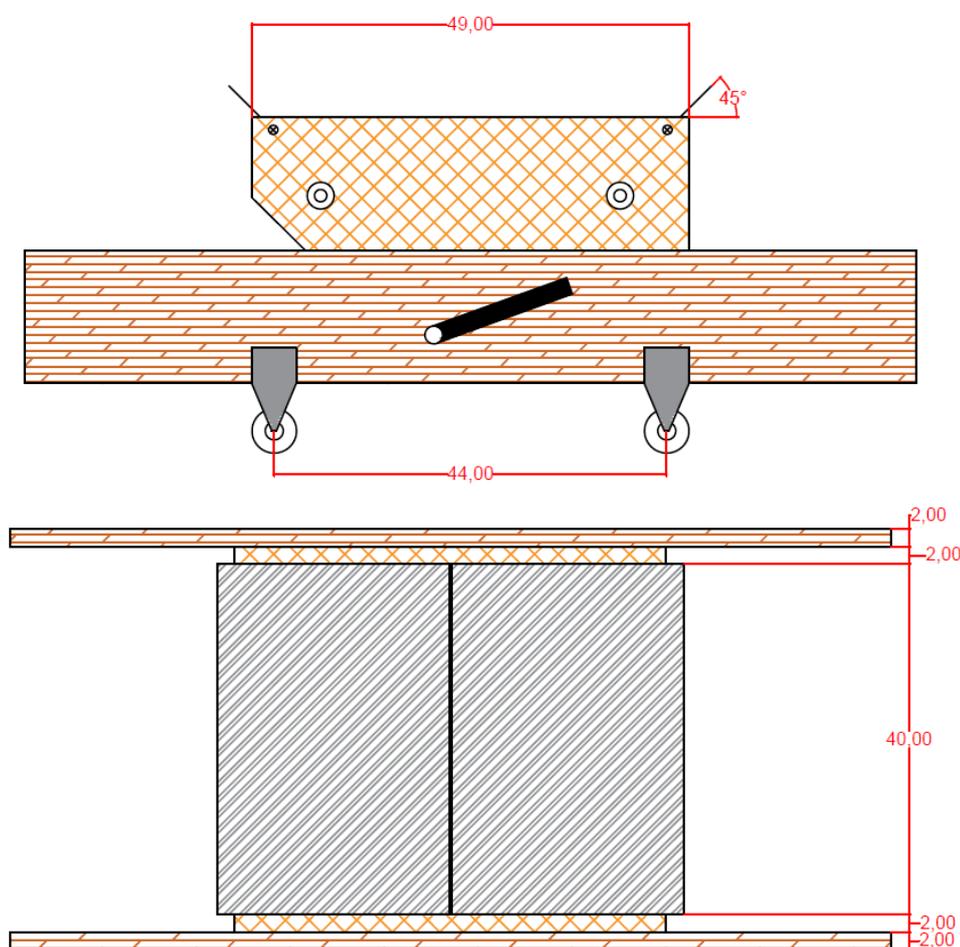


Figura 4.3 – Esboço do pluviador visto lateralmente (figura de cima) e visto em planta (figura de baixo) devidamente cotado (medidas em centímetros).



Figura 4.4 – Modelo reduzido do pluviador.



Figura 4.5 – Pormenor da parte inferior do pluviador.



Figura 4.6 – Sistema de pluviação com os respetivos carris.



Figura 4.7 – Cortina formada pela areia durante a pluviação.

5. ENSAIOS DE PLUVIAÇÃO

5.1. Considerações iniciais

Este projeto experimental tem a vertente de permitir perceber a influência na densidade relativa de alguns parâmetros associados ao sistema de pluviação, tais como a altura de queda, o fluxo de queda, a forma do molde utilizado, a velocidade de translação do pluviador e o modo de deposição, pelo que neste capítulo do projeto irão ser apresentados todos os resultados obtidos com os testes de pluviação realizados, recorrendo aos diferentes métodos. Para além disso, será apresentada a análise e interpretação dos mesmos, bem como eventuais problemas e erros que possam ter influenciado de alguma forma os valores obtidos. Todavia, todos os inconvenientes encontrados ao longo dos ensaios foram minimizados e contornados o máximo possível. Desta forma, seguidamente encontram-se os valores que revelam a influência, essencialmente, da altura de queda e do fluxo de queda para o sistema de pluviação e para a areia em estudo.

5.2. Ensaio preliminares

Inicialmente realizaram-se alguns ensaios preliminares de pluviação tendo como principais objetivos ter uma noção experimental do processo de pluviação, perceber eventuais problemas que poderiam surgir aquando a realização de ensaios e ganhar alguma sensibilidade e espírito crítico perante este processo. Estes ensaios foram realizados com pequenos funis perfurados existentes no laboratório de Geotecnia (Figura 5.1), bem como a utilização do modelo de cartão relativo ao modelo à escala reduzida do pluviador. Nestes ensaios realizaram-se pequenas experiências como a utilização de um peneiro de malha de 2 mm de abertura, onde se realizaram ensaios com os funis perfurados sobre o mesmo, mas também com algum espaçamento entre eles. Durante a execução dos ensaios foram começando a surgir pequenos problemas que teriam de ser contornados numa fase posterior, tais como o facto de se usar funis perfurados com praticamente o mesmo diâmetro que o molde circular utilizado, o que leva a que se o funil não tiver exatamente centrado com o molde comece a ocorrer um enchimento mais rápido de um dos lados do molde, o que causa que as partículas comecem a rolar para o lado menos cheio, levando assim a erros cruciais na uniformidade da densidade relativa do provete. Ainda que se centre o funil perfurado com o molde, existem por vezes correntes de ar que quando a areia se encontra em pluviação podem criar esse tal enchimento não uniforme, pelo que a melhor solução será optar por utilizar funis perfurados com um diâmetro superior ao do molde utilizado. Este problema não foi o único encontrado, pois a realização do ensaio com um funil pouco perfurado encostado ao peneiro de malha de 2 mm levou a que começasse a ocorrer

colmatação da areia no funil, dado as partículas mais grossas da areia começarem a ficar retidas no peneiro. Outro problema encontrado refere-se à perfuração dos funis, em que alguns tinham furos bastante grandes e algum espaçamento entre eles o que originava a criação de pequenos cones dentro do molde, levando assim a que as partículas começassem a rolar entre si gerando erros significativos na uniformidade da densidade relativa, tal como foi referido anteriormente. Com todos estes fatores e apesar dos vários ensaios realizados, não foi possível obter valores fidedignos e coerentes. No entanto, foi possível retirar elações para os ensaios seguintes e assim tentar minimizar os erros na execução e nos valores obtidos.



Figura 5.1 – Funis Perfurados utilizados nos ensaios preliminares

5.3. Ensaios com baldes perfurados

5.3.1. Ensaios com peneiro de 2 mm

Para a realização destes ensaios recorreu-se a um balde perfurado na base, com 3 mm de diâmetro de abertura nos furos e com cerca de 1cm de espaçamento entre os mesmos. O facto de o balde possuir furos com 3 mm de diâmetro foi devido à caracterização granulométrica da areia em estudo, visto que a mesma possui partículas até 2 mm de diâmetro, sendo por isso este o diâmetro mínimo para que fosse possível realizarem-se testes de pluviação sem ocorrer a colmatação dos furos do balde. O sistema utilizado para realizar a pluviação consistiu em colocar o balde perfurado a uma determinada altura, suportado por dois barrotes de madeira, que eram assentes sobre um peneiro com uma malha de 2 mm de abertura e por sua vez este estaria assente sobre um contentor para o qual se iria realizar a pluviação. Dentro deste mesmo contentor, inseria-se o molde que seria ensaiado, sendo que nestes testes utilizaram-se dois tipos de moldes: um circular, já utilizado durante a determinação dos índices de vazios da areia, e um retangular. A utilização destes dois moldes é importante para perceber a influência das condições de fronteira perante os resultados obtidos para as diferentes densidades. Para o molde retangular foram determinadas as suas medidas com um paquímetro digital, tendo por base a média de valores retirados ao longo do molde, sendo que com esses valores foi possível obter

a área da base e o seu volume total (Quadro 5.1). Além disso, determinou-se o peso do molde vazio recorrendo a uma balança digital.

Quadro 5.1 – Dimensões do molde retangular.

Molde Retangular					
Largura		Altura		Comprimento	
11 (cm)	10,020	h1 (cm)	10,093	c1 (cm)	19,964
12 (cm)	10,048	h2 (cm)	10,082	c2 (cm)	19,981
13 (cm)	10,052	h3 (cm)	10,084	c3 (cm)	19,955
1 (médio)	10,040	h4 (cm)	10,064	c (médio)	19,967
		h5 (cm)	10,026		
		h (médio)	10,070		

Peso do Molde (g)	9291,8
Área da base (m ²)	2,00E-02
Volume Total (m ³)	2,02E-03

Seguidamente foram realizados os ensaios de pluviação para diferentes alturas de queda, medidas a partir da malha do peneiro até à superfície do provete utilizado. Para o molde circular foram utilizadas cinco alturas de queda, sendo elas: 10,2 cm, 20,5 cm, 41,5 cm, 63 cm e 102 cm, onde foram realizados cinco ensaios para cada uma das alturas de queda. Em todos estes ensaios foram medidas as quantidades de areia inseridas no balde perfurado, o tempo de queda do processo de pluviação até ao preenchimento do molde e por fim a massa do provete com areia.

Após todo o sistema de pluviação preparado, a altura de queda especificada, inseria-se um pedaço de cartão na base do balde perfurado e preenchia-se o mesmo com areia, previamente pesada. De seguida, iniciava-se o processo de pluviação através da remoção do pedaço de cartão na base do balde e finalizava-se o mesmo após o preenchimento completo do molde (Figura 5.2). No Quadro 5.2 estão apresentados os valores médios obtidos para a densidade relativa da areia para as diferentes alturas de queda, bem como os valores do desvio padrão relativos aos valores adquiridos nos cinco ensaios, para cada uma das alturas de queda.



Figura 5.2 – Realização do processo de pluviação com utilização de um peneiro.

Quadro 5.2 – Resultados da densidade relativa e respetivo desvio padrão.

Molde Circular		
Altura de queda (cm)	Densidade Relativa (%)	Desvio Padrão
10,2	81,8	0,77
20,5	88,2	1,17
41,5	87,87	1,17
63	86,76	1,02
102	85,4	2,84

Observando atentamente os valores anteriormente obtidos e a Figura 5.3, torna-se perceptível verificar que os valores da densidade relativa são bastante altos e a variação dos valores para cada uma das alturas de queda é praticamente insignificante, isto porque existem variações cerca de 1%, o que pode ser desprezado. A única altura de queda que apresenta alguma diferença no seu valor perante as outras é a altura mais baixa, sendo que estes resultados não são muito fidedignos, visto que a altura de queda de 10,2 cm é cerca de 50% da altura total entre a base do peneiro e a base do molde, tendo este uma altura média de 11,697 cm. O facto destes valores permanecerem praticamente constantes com o aumento da altura de queda deve-se ao facto da utilização do peneiro de malha de 2 mm, que foi utilizado para um espalhamento das partículas quando o decorrer do processo de pluviação, mas que acabou por ter uma função que não era a esperada. A função era fazer com que as partículas de areia quando embatessem no peneiro perdessem velocidade, levando assim que o fluxo de queda e a altura de queda deixassem de ter influência. Para além disso, através do quadro observa-se que os cinco ensaios realizados para cada uma das alturas de queda foram bastante próximos uns dos outros, tendo

o desvio padrão um valor máximo de 2,84 para a altura mais alta. Este desvio padrão para a altura de 102 cm pode dever-se ao facto de por vezes ser bastante difícil de inserir o molde exatamente no alinhamento da perfuração do balde, assim como também das correntes de ar.

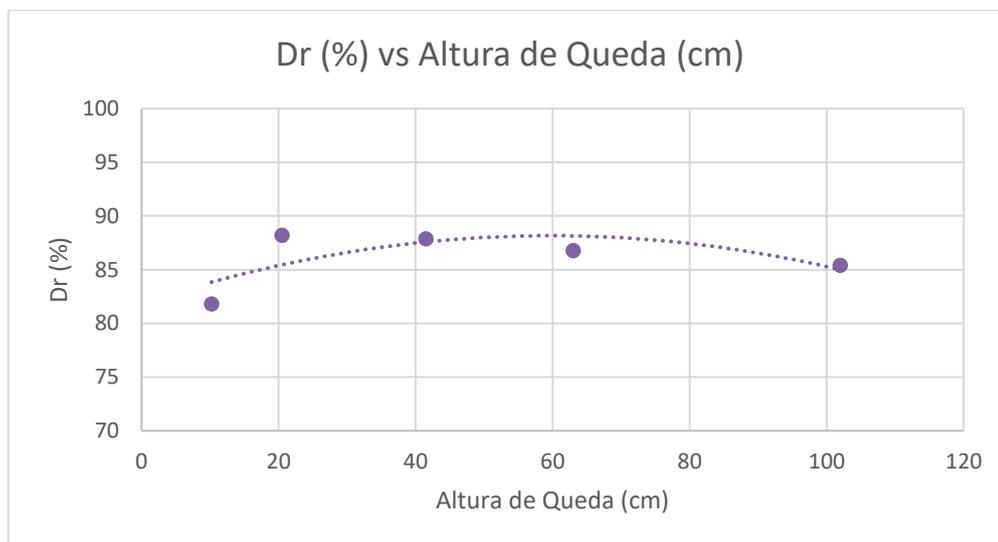


Figura 5.3 – Variação da densidade relativa com a altura de queda com uso do peneiro.

Posteriormente, realizaram-se ensaios com o mesmo sistema utilizando o molde retangular, onde se determinaram valores da densidade relativa para duas alturas de queda de 42,5 cm e 65 cm entre a base do peneiro de malha de 2 mm e a superfície do molde. Para a altura mais baixa foram realizados dois ensaios, enquanto para a mais alta foram realizados cinco. Aplicando o mesmo método quando aplicado ao molde circular e medindo os mesmos valores, realizaram-se então os ensaios obtendo, como podemos ver no Quadro 5.3, os valores médios para a densidade relativa e os valores dos desvios padrão.

Quadro 5.3 – Resultados da densidade relativa e respetivo desvio padrão.

Molde Retangular		
Altura de queda (cm)	Densidade Relativa (%)	Desvio Padrão
42,5	86,45	0,47
65	83,72	0,74

Analisando os dados obtidos, podemos verificar que os valores da densidade relativa continuam bastante altos e sem uma diferença significativa, de cerca de 3%, embora para a menor altura de queda se tenha realizado apenas dois ensaios, visto que não seria relevante continuar a realizar ensaios de pluviação utilizando o peneiro debaixo dos baldes perfurados. Porém, é de

realçar que para a altura de 65 cm, onde foram realizados cinco ensaios e o valor de desvio padrão é baixo, de 0,74, comparativamente com a altura de 63 cm do provete circular, houve uma diminuição nos valores de densidade relativa, ocorrendo uma diminuição de 3%, o que quer dizer que os efeitos de fronteira têm alguma influência nos valores da densidade relativa.

Durante estes ensaios, ocorreram algumas dificuldades e a perfuração do balde foi uma delas, sendo que após a perfuração de um furo tinha de se retirar o excesso de plástico que por vezes ficava a colmatar o mesmo. Para além disso, o sistema de abertura para o início do processo de pluviação foi algo que dificultou bastante os ensaios, pois o pedaço de cartão teria de estar mesmo junto à base do balde perfurado para que não ocorressem perdas de areia, o que após a inserção da areia no balde, este se tornava bastante pesado para ser possível a retirada do pedaço, o que por vezes requeria um pequeno e ligeiro movimento de levantamento para que fosse possível retirar o pedaço de cartão. Outra dificuldade já enumerada anteriormente é o caso do centrar do balde perfurado com o molde.

5.3.2. Ensaios sem peneiro

Para a realização destes ensaios foi adotado o mesmo sistema que para os ensaios anteriores, sendo que a única diferença consistiu na não utilização do peneiro de malha de 2 mm entre o molde e o balde perfurado. Todavia, nestes ensaios foi utilizado não apenas um balde perfurado com furos de 3 mm de diâmetro, mas também um balde perfurado com furos de 4 mm e outro com furos de 6 mm, isto para que fosse possível obter resultados para diferentes fluxos de queda. A maioria destes ensaios foram realizados com o molde circular, contudo foram realizados ensaios também com o molde retangular já referido anteriormente e um molde circular, mas de maiores dimensões (Quadro 5.4).

Quadro 5.4 – Dimensões do molde circular grande.

Molde Circular Grande			
Diâmetro		Altura	
d1 (cm)	15,199	h1 (cm)	17,82
d2 (cm)	15,221	h2 (cm)	17,795
d3 (cm)	15,196	h3 (cm)	17,804
d (médio)	15,205	h (médio)	17,806

Peso do Molde (g)	7460,7
Área da base (m ²)	1,82E-02
Volume Total (m ³)	3,23E-03

Para os moldes retangular e circular de maiores dimensões foram realizados testes apenas para uma altura e para um fluxo de queda, com o objetivo de perceber a influência do tamanho e da forma dos moldes em relação aos valores das densidades obtidas. Já para o molde circular de menores dimensões foram realizados ensaios com cinco alturas de queda: 45 cm, 56,6 cm, 70 cm, 83,3 cm e 100 cm e com três fluxos diferentes correspondentes aos baldes anteriormente mencionados de 3 mm, 4 mm e 6 mm de diâmetro dos seus furos. Em todos estes testes foram determinadas as massas de areia que se inseriram dentro dos baldes recorrendo a uma balança digital, bem como o tempo de queda correspondente ao enchimento total do molde utilizado. Posteriormente, retirou-se a massa do provete com areia e calcularam-se os valores das densidades relativas através dos valores dos índice de vazios obtidos em cada ensaio. Para cada uma das alturas de queda e para cada abertura de furos utilizada nos baldes foram realizados três ensaios. Tal como nos ensaios anteriores, para se dar início ao processo de pluviação teria de se retirar um pedaço de cartão no fundo da base dos baldes utilizados, o que era bastante difícil devido ao peso do balde preenchido de areia, pelo que se levantava ligeiramente o balde para que se iniciasse a respetiva pluviação. Seguidamente são apresentados os resultados para as densidades relativas médias obtidas para as diferentes alturas de queda, para as diferentes aberturas dos baldes utilizados e ainda para os diferentes moldes ensaiados (Quadro 5.5). Além disso, é apresentado também no Quadro 5.6 os valores dos desvios padrão dos três ensaios realizados para cada altura de queda e cada abertura utilizada nos baldes.

Quadro 5.5 – Resultados da densidade relativa nos diferentes moldes.

	Densidade Relativa (%)			
	Altura de queda (cm)	Abertura (mm)		
		6,00	4,00	3,00
Molde Circular Pequeno	45	62,53	75,91	78,60
	56,6	64,54	77,83	80,77
	70	69,19	79,46	82,59
	83,3	70,32	79,66	82,87
	100	71,91	77,92	81,44
Molde Circular Grande	56,2	-	-	79,11
Molde Retangular	56,6	-	-	71,95

Quadro 5.6 – Valores do desvio padrão dos resultados obtidos.

	Desvio Padrão			
	Altura de queda (cm)	Abertura (mm)		
		6,00	4,00	3,00
Molde Circular Pequeno	45	0,84	0,50	0,34
	56,6	0,71	0,41	0,49
	70	0,89	1,19	1,18
	83,3	0,74	0,30	0,37
	100	0,24	0,46	0,98
Molde Circular Grande	56,2	-	-	0,07
Molde Retangular	56,6	-	-	0,37

Como ao longo dos ensaios foram retirados os tempos de queda para o preenchimento do molde, foi possível calcular os valores médios de fluxo de queda para cada altura de queda e para cada abertura de furos do balde, quantificando o quociente entre a massa de areia do provete com o respetivo tempo de queda em segundos. De seguida, obteve-se o valor médio para cada uma das aberturas por tipo de molde estudado.

Quadro 5.7 – Resultados do fluxo de queda nos diferentes moldes.

	Fluxo de Queda (g/s)			
	Altura de queda (cm)	Abertura (mm)		
		6,00	4,00	3,00
Molde Circular Pequeno	45	195,91	91,05	41,93
	56,6	201,39	87,91	47,68
	70	194,57	96,01	47,84
	83,3	237,73	114,77	46,43
	100	175,79	95,33	45,59
Molde Circular Grande	56,2	-	-	64,03
Molde Retangular	56,6	-	-	51,08

Com todos os resultados obtidos, foram elaborados os seguintes gráficos de comparação entre os valores da densidade relativa, em percentagem, com a altura de queda, em centímetros (Figura 5.4) e com o fluxo de queda, em gramas por segundo (Figura 5.5), unicamente para o molde circular de menores dimensões.

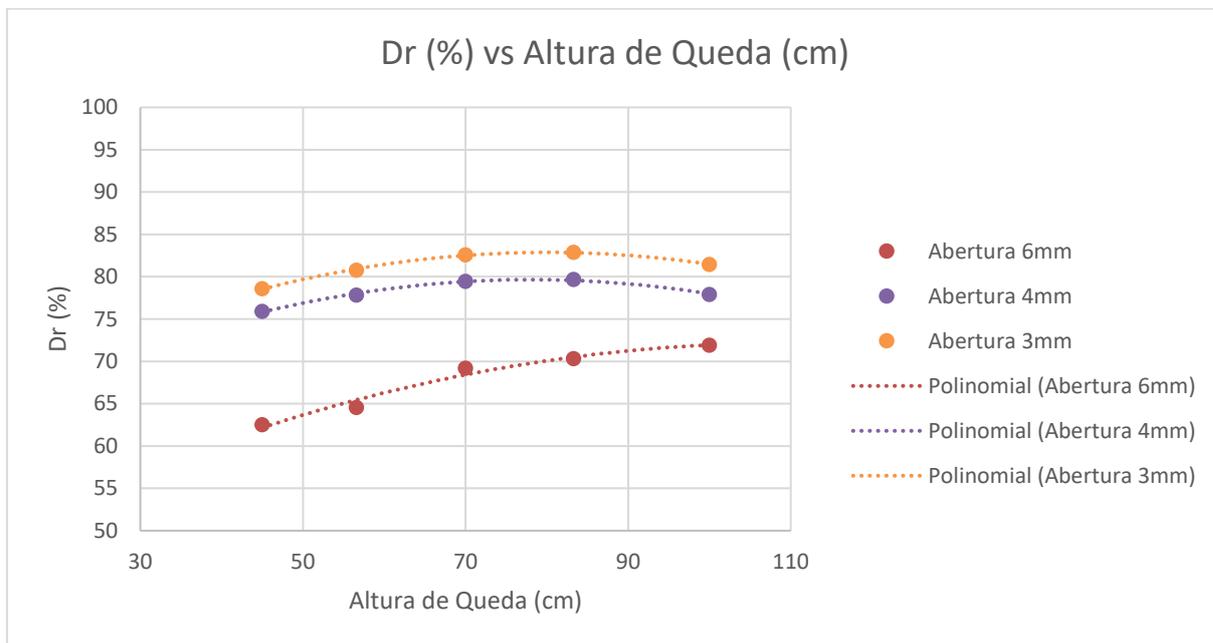


Figura 5.4 – Variação da densidade relativa com a altura de queda para as diferentes aberturas.

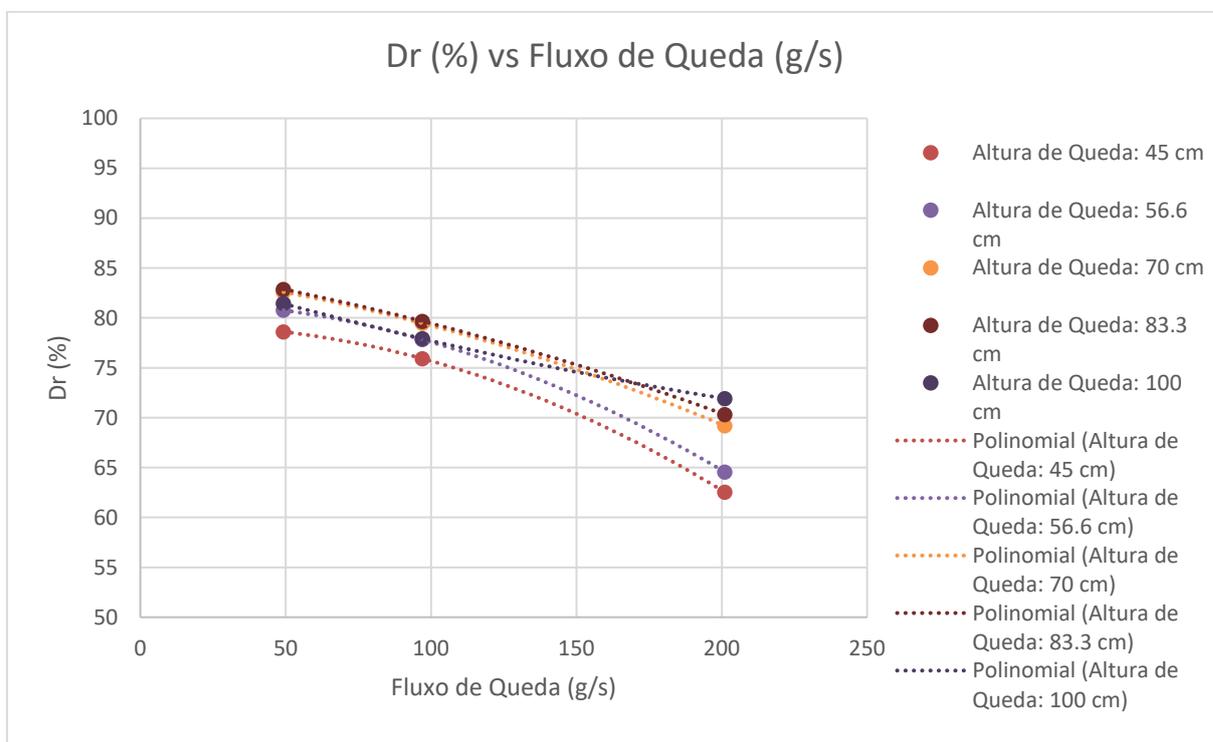


Figura 5.5 – Variação da densidade relativa com o fluxo de queda para as diferentes alturas de queda.

Após a análise das figuras, onde foram traçadas linhas de tendência polinomiais de segundo grau entre os valores obtidos, verificamos que existe uma diferença significativa no uso de aberturas diferentes para os furos no balde, tanto para a altura de queda como para o fluxo de queda. Das figuras anteriores, observamos que quanto menor for a abertura dos furos, menor é o fluxo de queda, maiores são os valores de densidade relativa obtidos. Isto deve-se ao facto de as partículas de areia possuírem um maior tempo para se arranjam entre si devido à menor quantidade de areia que cai por segundo, enquanto que com uma maior abertura dos furos, maior é o fluxo de queda, maior será a quantidade de areia a ser pluvitada por segundo, pelo que o tempo de arranjo das partículas de areia torna-se muito menor. Além disso, reparamos que a partir da altura de queda de 70 cm não existe um aumento significativo da densidade relativa, contrariamente, até essa altura de queda existe um ligeiro aumento dos valores, cerca de 4% para a abertura de 4 mm e para a abertura de 3 mm. A partir dos 70 cm, existe um aumento de 2% na abertura de 6 mm e um decréscimo de cerca 2% nas aberturas de 3 mm e 4 mm, sendo que isto não deveria ocorrer, pois se a altura crítica foi atingida então os valores deveriam permanecer constantes e não decrescerem. Isto pode dever-se a erros associados às correntes de ar e ao posicionamento do balde utilizado e do molde, pois se não estiver bem centrado poderá ocorrer um enchimento mais rápido de um dos lados do molde, o que faz com que as partículas comecem a rolar para a parte mais baixa do molde, o que cria erros nos valores das densidades relativas. Para além disto, através do Quadro 5.6 verificamos que os valores obtidos nos três ensaios para cada altura de queda e para cada abertura são bastante próximos, visto que o valor máximo de desvio padrão obtido é de 1,19.

Já em relação à forma e ao tamanho dos moldes, através do Quadro 5.5, verificamos que para uma altura de queda semelhante, na casa dos 56 cm, os moldes circulares apesar do seu tamanho ser diferente, cerca de quatro vezes superior em volume um em relação ao outro, os valores das densidades relativas são bastante próximos, existindo apenas uma diferença de 1,5%, o que é praticamente desprezável. Em termos de forma dos moldes já existe uma diferença que deve ser considerada, pois entre o molde circular de pequenas dimensões e o molde retangular existe uma variação cerca de 9%, embora o volume do molde retangular seja praticamente o dobro do circular de pequenas dimensões (Figura 5.6). Contudo, como foi confirmado anteriormente, o tamanho pouco interfere nos valores de densidade relativa, e comparando o molde circular de grandes dimensões com o molde retangular continua a observar-se que existe uma diferença de 8% e os seus volumes são semelhantes.



Figura 5.6 – Realização de um ensaio de pluviação sem peneiro e com o molde retangular.

Com estes ensaios foi então possível perceber a influência da altura de queda, do fluxo de queda, do tamanho dos moldes bem como da sua forma. Com um aumento da altura de queda existe um aumento da densidade relativa até a uma determinada altura, designada altura crítica, que por muito que se aumente a altura de queda, a densidade relativa irá permanecer aproximadamente constante, sendo que neste caso aparentemente a altura crítica poderá rondar os 70 cm. Com um aumento de fluxo, consegue-se menores valores de densidade relativa devido ao arranjo das partículas, sendo que a maior variação obtida foi cerca de 16%. Em relação ao tamanho dos moldes, como foi referido anteriormente, não influencia em nada a densidade relativa, já a sua forma é condicionante, devido aos efeitos fronteira, pois quanto maiores forem esses efeitos mais influencia irá ter os valores da densidade relativa.

5.4. Ensaio com modelo à escala reduzida

Após a realização dos ensaios de pluviação recorrendo a baldes perfurados com uma abertura controlada, fizeram-se ensaios com o modelo à escala reduzida, tendo como objetivo principal perceber o funcionamento do mesmo e avaliar a viabilidade da sua construção num modelo à escala real. Para além disso era importante saber quais as gamas de valores esperados para as densidades relativas quando se fosse construir e dimensionar o sistema à escala real. Estes testes foram realizados dentro do depósito usado anteriormente para inserir o molde, sobre o qual se colocaram os carris para guiar o movimento do modelo. Em todos os ensaios foi usado o molde retangular já utilizado nos ensaios anteriores, visto que tem semelhança de escala ao tanque de ensaios, também ele retangular, para o qual se pretende dimensionar um sistema de pluviação

à escala real. Além disso foi imposta manualmente ao pluviador uma velocidade aproximadamente constante durante todos os ensaios, sendo de notar que este processo é bastante difícil e não isento de erro, nomeadamente quanto à homogeneidade do provete. Os dados retirados destes ensaios foram o tempo de queda até ao preenchimento do molde e a massa do provete com areia, determinada através de uma balança digital. A massa inserida no pluviador não foi contabilizada visto que não seria relevante para os ensaios, pois apenas foi necessário garantir a continuidade da pluviação sem que ocorresse falta de areia no interior do pluviador.

Numa primeira fase realizaram-se ensaios com uma malha de rede para duas alturas de queda e apenas para uma abertura de 3 mm do rasgo do modelo, com o objetivo de verificar se ocorreria a mesma situação dos testes de pluviação com os baldes perfurados, em que os valores da densidade eram praticamente constantes, independentemente da altura de queda. As alturas de queda ensaiadas foram de 49 cm e de 73,5 cm, onde para cada uma delas, se realizaram três ensaios. Seguidamente encontram-se representados no Quadro 5.8 os valores médios obtidos para as densidades relativas, bem como os valores dos desvios padrão dos três ensaios para cada altura de queda.

Quadro 5.8 – Resultados da densidade relativa e respetivo desvio padrão.

Pluviador Com Rede		
Altura de queda (cm)	Densidade Relativa (%)	Desvio Padrão
49	80,95	0,31
73,5	81,87	0,33

Além dos valores anteriormente obtidos, através dos valores do tempo de queda de cada ensaio com a massa de areia do provete, foi possível retirar o valor de fluxo de queda, em gramas por segundo, como podemos observar seguidamente no Quadro 5.9.

Quadro 5.9 – Resultados do fluxo de queda.

Pluviador Com Rede	
Altura de queda (cm)	Fluxo de Queda (g/s)
49	32,88
73,5	28,44

Com todos estes valores alcançados facilmente se conclui que o que aconteceu nos ensaios anteriores se mantém, pois para duas alturas de queda diferentes em cerca 23 cm, foi obtida

uma diferença desprezável (inferior a 1%) nos valores de densidade relativa, com todos os valores bastante próximos uns dos outros como mostra o valor reduzido do desvio padrão.

Seguidamente, foram realizados ensaios sem a utilização da malha de rede, nos quais foram usadas quatro alturas de queda: 38,3 cm, 52,1 cm, 67 cm e 82 cm, e dois tipos de abertura no rasgo do modelo de 3 mm e 4 mm, sendo que para cada altura de queda e cada abertura foram realizados três ensaios. Os quadros e as figuras seguintes apresentam os valores médios obtidos para as densidades relativas, para cada uma das alturas e para cada abertura do modelo, os valores dos desvios padrão e ainda os valores de fluxo de queda, mais uma vez em gramas por segundo.

Quadro 5.10 – Resultados da densidade relativa e respetivo desvio padrão.

Pluviador Sem Rede				
Altura de queda (cm)	Densidade Relativa (%)		Desvio Padrão	
	Abertura (mm)		Abertura (mm)	
	3,00	4,00	3,00	4,00
38,3	56,71	39,30	0,59	0,24
52,1	59,16	47,91	0,44	0,37
67	68,33	57,01	0,57	0,38
82	69,54	60,71	0,10	0,41

Quadro 5.11 – Resultados obtidos para o fluxo de queda.

Pluviador Sem Rede		
Fluxo de Queda (g/s)		
Altura de queda (cm)	Abertura (mm)	
	3,00	4,00
38,3	38,70	54,71
52,1	37,53	55,49
67	35,77	51,68
82	34,50	48,65

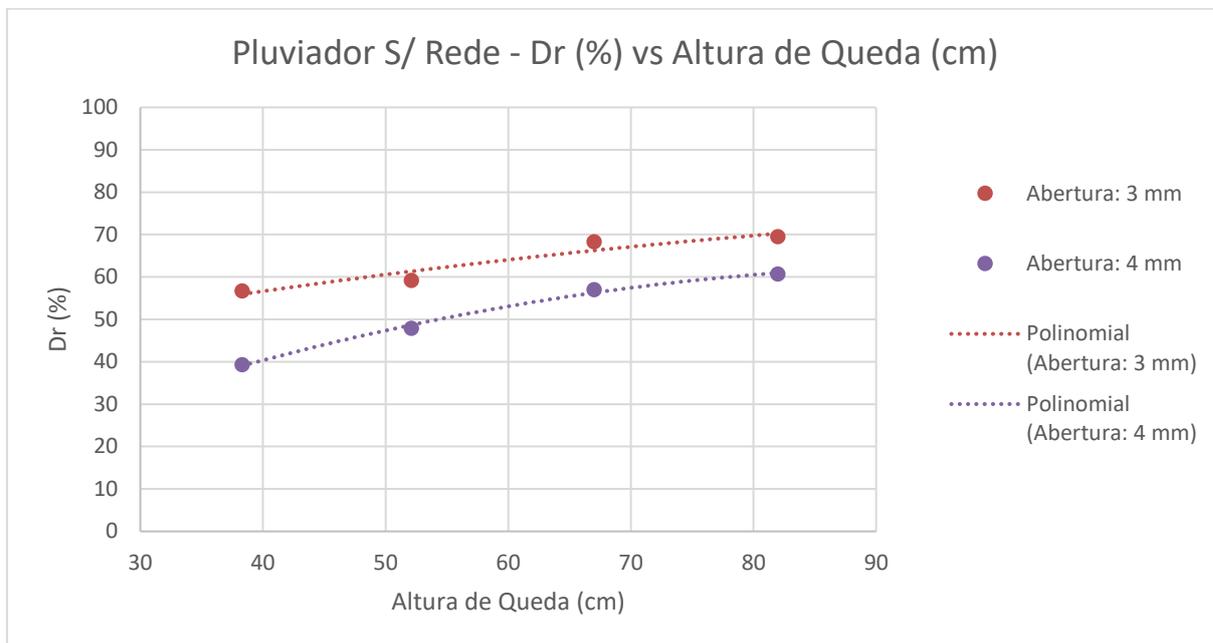


Figura 5.7 – Variação da densidade relativa com a altura de queda para as diferentes aberturas.

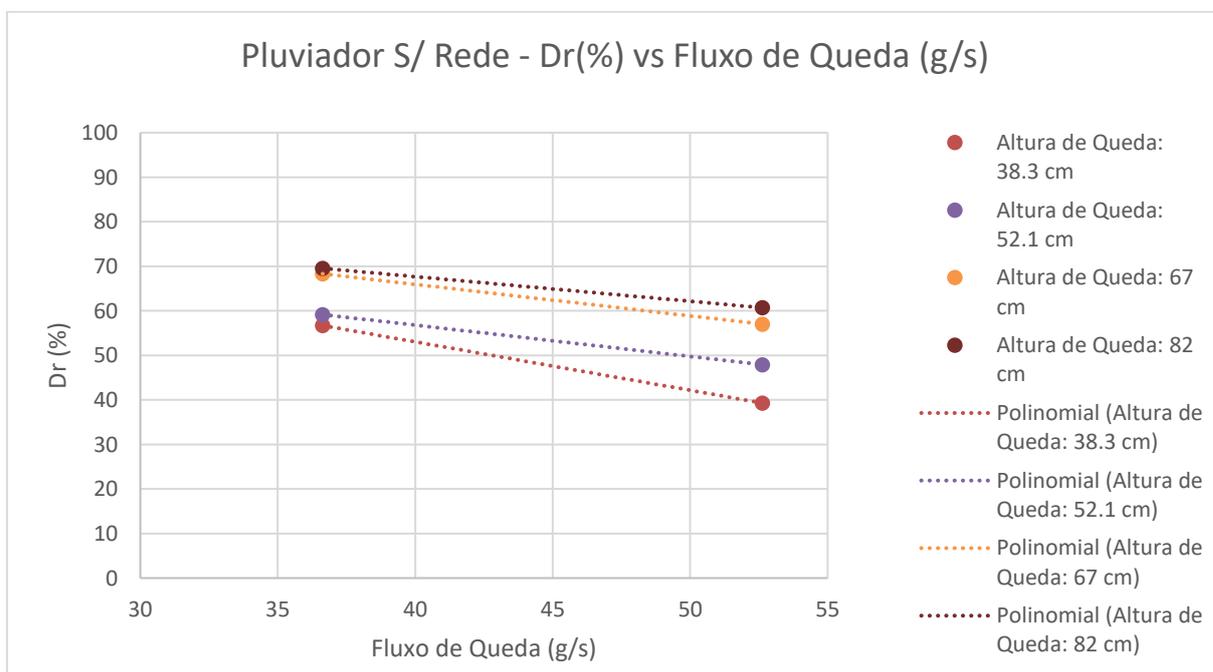


Figura 5.8 – Variação da densidade relativa com o fluxo de queda para as diferentes alturas de queda.

Analisando os resultados obtidos, é possível observar que existe um aumento nos valores de densidade relativa com um aumento da altura de queda tal como foi concluído por Zhao *et al.* (2006) no Quadro 2.3, seja qual for a abertura da base do pluviador. Com uma abertura de 3 mm, houve um acréscimo de 13% entre a altura mais baixa e a mais alta, com uma variação cerca de 45 cm. Já com uma abertura de 4 mm, ocorreu uma maior variação nos valores da densidade relativa para a mesma variação da altura de queda, cerca de 21%. Analisando os dados dos desvios padrão é notório que os resultados dos ensaios se encontram muito próximos uns dos outros visto que o valor máximo de desvio é de 0,59. Em relação ao fluxo de queda, existe uma diminuição da densidade relativa com o aumento do fluxo, o que é expectável, sendo maior a importância no fluxo de queda para menores alturas de queda.



Figura 5.9 – Pluviação de areia durante um ensaio sem utilização de malha.

Com estes ensaios podem-se confirmar os testes realizados anteriormente, em que com um aumento da altura de queda existe um aumento da densidade relativa, contrariamente, com um aumento do fluxo de queda existe uma diminuição da densidade relativa. Além disso, constata-se também que o uso de qualquer malha ou peneiro irá influenciar os ensaios e faz com que a altura e o fluxo de queda deixem de ter qualquer influência. Por outro lado, é perceptível a altura de queda crítica que se conseguiu obter com estes ensaios, sendo que a mesma ronda os 70 cm.

5.5. Ensaios com modelo à escala reduzida no tanque de ensaios

Os últimos ensaios foram realizados dentro do tanque de ensaios com o modelo à escala reduzida do pluviador e tinham como principal objetivo avaliar a influência da altura de queda no tanque onde se pretende elaborar e dimensionar o sistema de pluviação automatizado à escala

real. Para além disso foi estudada a influência da abertura do pluviador e a capacidade que o pluviador tem para realizar as várias passagens, de um lado ao outro do tanque, em função dessa abertura. Para a execução destes ensaios foram utilizados quatro moldes retangulares, um deles já usado nos ensaios anteriores (molde número 1 – Quadro 5.1) enquanto aos outros três tiveram de ser retiradas as suas medidas tendo em conta valores médios, bem como o seu peso (Quadros 5.12, 5.13 e 5.14).

Quadro 5.12 – Dimensões do molde retangular nº2.

Molde 2					
Largura		Altura		Comprimento	
11 (cm)	10,009	h1 (cm)	10,010	c1 (cm)	19,975
12 (cm)	10,034	h2 (cm)	9,996	c2 (cm)	19,977
13 (cm)	10,006	h3 (cm)	9,988	c3 (cm)	19,984
l (médio)	10,016	h (médio)	9,998	c (médio)	19,979

Peso do Molde (g)	9129
Área da base (m ²)	2,00E-02
Volume Total (m ³)	2,00E-03

Quadro 5.13 – Dimensões do molde retangular nº3.

Molde 3					
Largura		Altura		Comprimento	
11 (cm)	10,176	h1 (cm)	10,066	c1 (cm)	19,973
12 (cm)	10,175	h2 (cm)	10,017	c2 (cm)	19,972
13 (cm)	10,067	h3 (cm)	10,043	c3 (cm)	19,962
l (médio)	10,139	h (médio)	10,042	c (médio)	19,969

Peso do Molde (g)	9330,5
Área da base (m ²)	2,02E-02
Volume Total (m ³)	2,03E-03

Quadro 5.14 – Dimensões do molde retangular nº4.

Molde 4					
Largura		Altura		Comprimento	
11 (cm)	10,064	h1 (cm)	10,071	c1 (cm)	19,980
12 (cm)	10,122	h2 (cm)	10,048	c2 (cm)	19,975
13 (cm)	10,027	h3 (cm)	10,095	c3 (cm)	19,977
l (médio)	10,071	h (médio)	10,071	c (médio)	19,977

Peso do Molde (g)	9305,2
Área da base (m ²)	2,01E-02
Volume Total (m ³)	2,03E-03

Estes quatro moldes foram colocados em alturas definidas a partir da base do tanque, sendo que o primeiro era colocado junto à base, tendo apenas uma chapa metálica por baixo para facilitar a sua retirada após o enchimento para a pesagem, enquanto os outros três foram colocados a uma altura cerca de 40 cm, 80 cm e 120 cm a partir da base (Figura 5.11). Todos os moldes foram preenchidos num único ensaio, isto é, com o enchimento a ser feito de forma sequencial com a passagem do pluviador (Figura 5.12). A colocação dos moldes foi efetuada sobre pequenas placas de esferovite e de madeira para se conseguirem as várias alturas. Durante a colocação, deixou-se uma pequena margem sobre um dos lados do tanque para que quando se fosse realizar a abertura do pluviador não ocorresse uma queda espontânea de areia que estaria acumulada entre o rasgo do pluviador e o sistema de abertura do mesmo. Seguidamente foram colocados os carris por cima do tanque e o respetivo pluviador, sendo que, posteriormente foram medidas as alturas de queda desde a superfície de cada molde à abertura do pluviador (Figura 5.13). Para facilitar o enchimento do pluviador durante os ensaios, foi colocado um depósito de areia na parte superior do tanque com a ajuda de uma ponte rolante existente no Laboratório de Geotecnia. Com isto e com a abertura do pluviador completamente definida, encheu-se o mesmo com areia e realizou-se uma série de passagens sobre os moldes. Verificou-se que um enchimento do pluviador não era suficiente para realizar o enchimento de todos os moldes, pelo que teve de se parar o processo de pluviação e voltar a abastecer o pluviador de areia e então dar continuidade ao processo. Este passo teve de ser repetido cerca de 3 a 4 vezes para cada ensaio realizado. A velocidade de passagem do pluviador era controlada manualmente, pois não houve possibilidade de colocar um sistema automático para controlar a velocidade de forma rigorosa e constante, visto tratar-se ainda de um modelo reduzido. A velocidade imposta manualmente conduz a erros ligeiros nos valores obtidos, contudo houve o cuidado de manter essa velocidade o mais uniforme possível, a rondar os 7 cm/s. Durante estas pequenas paragens para encher o pluviador, teve de se retirar alguma areia junto ao molde que se encontrava na base do tanque, isto porque a parte exterior do molde acumulava bastante areia o que poderia levar a que a areia começasse a escorrer para dentro do provete. Seguidamente, todo o sistema usado para estes ensaios é ilustrado na figura seguinte onde é possível verificar as alturas de queda e as alturas dos moldes desde a base do tanque até à sua superfície.

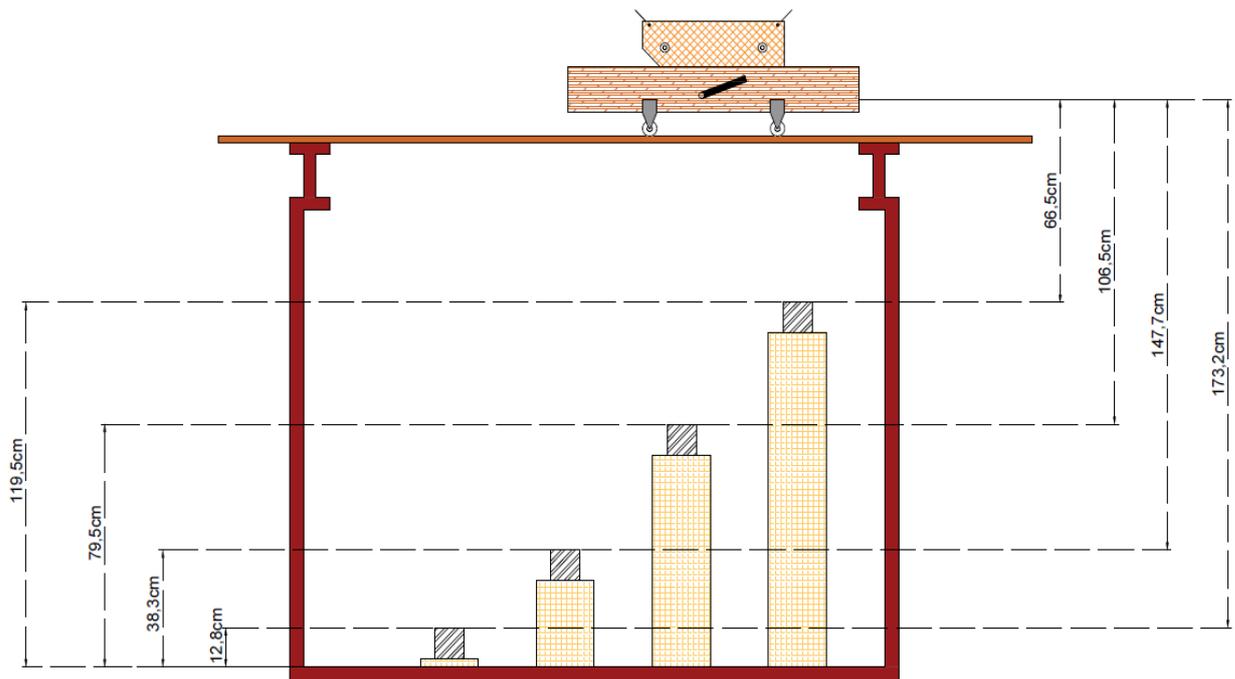


Figura 5.10 – Esquema do tanque de ensaios e alturas dos respectivos moldes onde foram realizados os ensaios de pluviação.



Figura 5.11 – Imagem real da colocação dos moldes dentro do tanque de ensaios.



Figura 5.12 – Pormenor dos provetes onde se verifica um maior preenchimento nos dois moldes centrais.



Figura 5.13 – Colocação do pluviador e dos carris sobre o tanque em relação aos provetes.

Durante a realização dos ensaios e impondo uma velocidade manual constante ao pluviador, ocorreu uma situação inesperada, mas que era quase impossível contornar. À medida que o pluviador se ia movendo de um lado para o outro, quando a areia embatia num molde colocado a maior altura a partir da base, fazia com que alguma da areia ressaltasse e preenchesse parcialmente o molde na altura imediatamente inferior. Contudo, esta ocorrência apenas acontecia nos dois moldes que se encontravam a meio do percurso, embora, como se verá adiante, os resultados não parecem ter sido muito influenciados por esta questão visto não haver grande dispersão entre eles.

Seguidamente e após o enchimento faseado de todos os moldes, finalizou-se cada ensaio com a medição do provete de areia e determinou-se, como nos ensaios anteriores, os valores das densidades relativas. Os valores do fluxo de queda não foram possíveis obter pois não foi contabilizado o tempo de queda total de cada ensaio, pelo que a comparação será feita através da abertura do rasgo do pluviador e não em termos de fluxo. No quadro e na figura seguinte encontram-se os valores médios das densidades obtidas e dos desvios padrão para cada altura de queda e para cada abertura do pluviador. Para obter o valor médio da densidade relativa foram realizados três ensaios para cada altura de queda e cada abertura do pluviador.

Quadro 5.15 – Resultados da densidade relativa e respetivo desvio padrão.

Altura desde a base (cm)	Altura de queda (cm)	Densidade Relativa (%)		Desvio Padrão	
		Abertura (mm)		Abertura (mm)	
		3,00	4,00	3,00	4,00
119,5	66,5	71,32	62,48	0,65	0,58
79,5	106,5	75,27	68,69	0,24	0,89
38,3	147,7	80,03	74,83	0,51	0,46
12,8	173,2	79,67	75,04	0,19	0,36

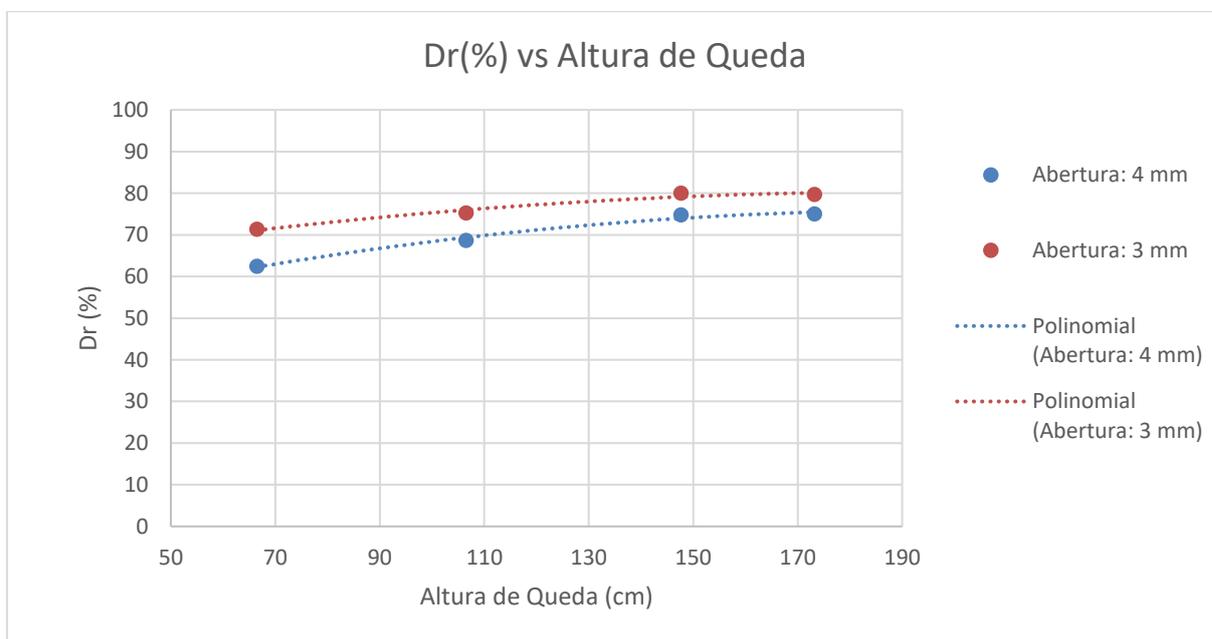


Figura 5.14 – Variação da densidade relativa com a altura de queda consoante a abertura do pluviador.

Analisando os dados obtidos após a realização dos ensaios, é notório que existe um aumento da densidade relativa com o aumento da altura de queda, sendo que em ambas as aberturas, a densidade relativa nas duas alturas de queda mais altas, 147,7 cm e 173,2 cm, se encontra praticamente constante, indicando que terá sido atingida a altura crítica. Porém, até à altura de 147,7 cm existe um aumento nos valores da densidade relativa para as duas aberturas do pluviador, tendo a abertura de 4 mm um maior crescimento dos valores, cerca de 13%, enquanto que a abertura de 3 mm cresce apenas 9%.

Observando ainda a Figura 5.14, percebe-se que se atingem maiores valores de densidade relativa com uma menor abertura, e sendo maior essa diferença para alturas de queda mais baixas, já que para a altura de queda de 147,7 cm existe uma diferença de 5% entre as densidades relativas, enquanto para a altura de queda de 66,5 cm essa diferença é de 9%. Por último, através dos valores do desvio padrão verifica-se que todos os ensaios produziram valores muito próximos uns dos outros, pois o valor máximo de desvio padrão obtido foi de 0,89, assegurando-se desta forma a repetibilidade do procedimento laboratorial.

6. CONCLUSÕES / TRABALHOS FUTUROS

6.1. Conclusões

Uma primeira conclusão que pode ser retirada é que grande parte dos fatores que previamente se encontravam listados como tendo influência nos valores da densidade relativa de um modelo, tais como a altura de queda, o fluxo de queda, o tipo de molde utilizado assim como o modo de deposição, com maior ou menos significado, foi comprovada a sua influência, nos valores da densidade relativa.

Os ensaios de pluviação realizados com vasos perfurados, utilizando um peneiro subjacente com a malha de 2 mm, sugerem para o facto de a utilização do peneiro ser um fator que influencia bastante a densidade relativa, pois foi possível comprovar que independentemente da altura de queda ou do tipo de molde utilizado, os valores da densidade relativa eram bastante altos a rondar os 85%. A altura de queda não tinha qualquer influência no processo de pluviação porque o peneiro, apesar da função de espalhamento das partículas de areia, fazia com que as partículas perdessem velocidade e que as mesmas caíssem sempre da mesma forma dentro do molde.

Posteriormente, sem a utilização de qualquer peneiro, foi possível obter valores correspondentes à influência dos vários fatores anteriormente mencionados. Concluiu-se assim que o tamanho do molde utilizado não influenciava a densidade relativa alcançada, em que para a mesma altura de queda se obteve praticamente o mesmo valor deste parâmetro, cerca de 80% para uma altura de 56 cm. Todavia, a utilização de moldes de diferentes formas influencia a densidade relativa obtida, onde para uma altura de 56 cm, um provete retangular obteve uma densidade 9% mais baixa do que para um provete circular, com valores de 81% e 72% respetivamente. Este facto vem comprovar Zhao *et al.* (2006), que advoga que os efeitos de fronteira são de bastante importância no processo de pluviação. Em relação ao fluxo de queda, comprova-se que quanto menor for o fluxo de queda maiores são os valores de densidade relativa obtidos sendo maior a sua importância para menores alturas de queda. Com todos os ensaios realizados foi possível obter densidades relativas entre 62% e 82%.

De seguida, realizaram-se os ensaios de pluviação com o modelo reduzido que correspondia a uma pluviação em cortina, contrariamente aos referidos anteriormente que era uma pluviação simultânea em toda a área do provete. Numa primeira fase, com a utilização de uma rede na parte inferior do pluviador, obtiveram-se densidades relativas a rondar os 81% para duas alturas

de queda diferentes, pelo que pode-se concluir o que anteriormente já tinha ocorrido, ou seja, que a rede influencia a pluviação das partículas devido à perda de velocidade que as mesmas sofrem. Seguidamente, retirou-se a rede e obtiveram-se resultados mais baixos para a densidade relativa, mas mais coerentes do ponto de vista da influência dos vários fatores. Pode-se concluir o que anteriormente já tinha sido concluído, em que com um menor fluxo e uma maior altura de queda se obtém valores de densidade relativa mais altos. Porém, a diferença entre as densidades relativas para uma altura de queda e dois diferentes fluxos tende a diminuir à medida que a altura de queda aumenta, pelo que se conclui que o fluxo de queda vai perdendo influência na densidade relativa com o aumento da altura de queda. Com estes ensaios de pluviação em cortina, através do modelo reduzido, foi possível obter densidades no intervalo de 39% a 70%, com fluxos de queda a variarem entre 34 g/s e 56 g/s. A obtenção de valores mais baixos da densidade relativa com a utilização do modelo reduzido pode dever-se ao facto de a velocidade de deslocamento manual do pluviador, que é sempre um fator de erro, poder influenciar o processo de pluviação.

Por último, a realização de ensaios de pluviação dentro do tanque de ensaios do laboratório permite ter uma melhor noção de como irá variar a densidade relativa com o sistema de pluviação a ser implementado. Nestes ensaios comprovou-se tudo aquilo que os ensaios anteriores já tinham concluído, todavia é possível verificar que para as duas alturas de queda maiores se obtém valores muito semelhantes da densidade relativa para cada um dos fluxos. Este facto é indicador de se estar próximo da altura de queda crítica, sendo que a mesma se situa por volta da altura de 1,48 m. As densidades relativas obtidas após a altura de queda crítica rondam os 80% para uma abertura do pluviador de 3 mm e 75% para uma abertura de 4 mm. Abaixo desta altura, obtiveram-se valores a variar entre os 62% e os 80% pelo que podemos concluir que o processo de pluviação através do modelo reduzido produz modelos densos a muito densos, o que torna este intervalo de densidades mais pequeno em relação a Carvalho (2012) em que era possível reproduzir modelos de 50 a 100%. Além disso, todos estes ensaios foram realizados com velocidades de deslocamento manuais pelo que, como foi referido anteriormente, pode influenciar o processo de pluviação.

Todos os ensaios realizados permitem concluir que é possível a instalação de um sistema de pluviação automatizado no tanque de ensaios do Laboratório de Geotecnia da FCTUC (Figura 6.1) pois permite produzir modelos com densidades relativas altas. Contudo, para a viabilização deste projeto deve-se ter em atenção os mais diversos aspetos que foram referidos durante os ensaios realizados, como é o caso da utilização, ou não, de uma malha, dependendo das densidades que se pretendam alcançar para o modelo, assim como as condições de fronteira do tanque que podem influenciar significativamente os valores da densidade relativa do modelo.

Para além disso, é de realçar que não é possível atingir modelos homogéneos em termos de compactidade, isto porque o sistema a implementar mantém a sua altura constante pelo que com o decorrer do processo de pluviação, a altura de queda irá diminuindo levando assim à diminuição da densidade relativa.

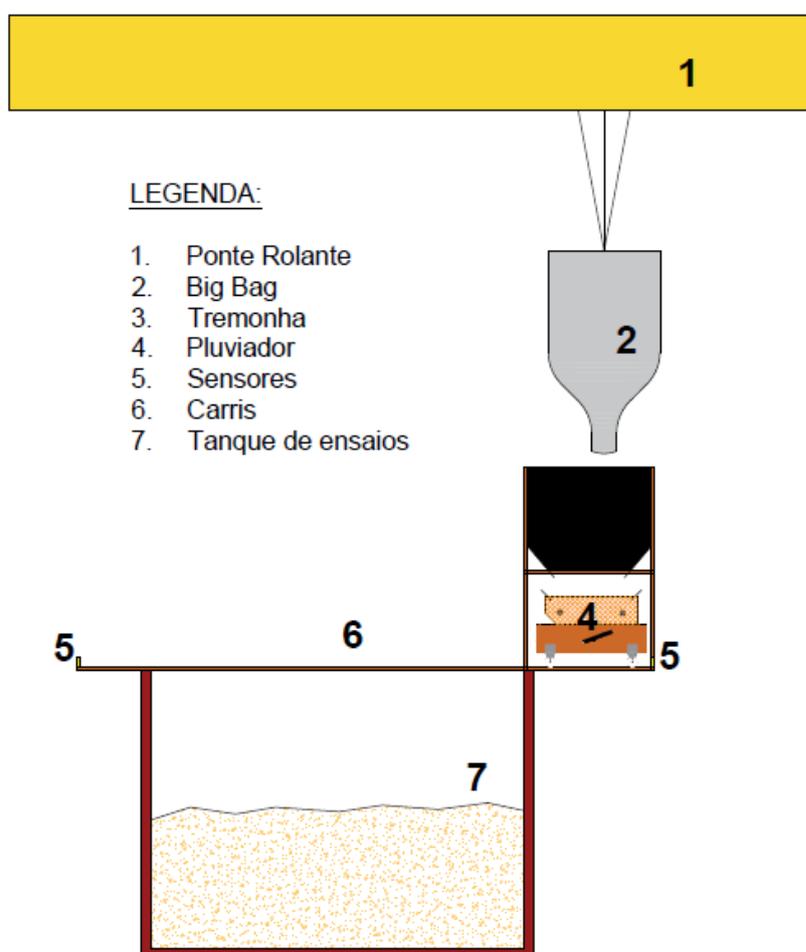


Figura 6.1 – Esboço do sistema de pluviação a ser implementado.

6.2. Trabalhos Futuros

Os objetivos iniciais deste projeto experimental foram concluídos, sendo de realçar que o objetivo final ainda não foi concretizado e que é a construção de um sistema de pluviação a funcionar sobre o tanque de ensaios que se encontra no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Com este facto seria de extrema importância dar continuidade ao desenvolvimento deste projeto, tendo em consideração os resultados obtidos preliminarmente através do modelo reduzido construído. Todavia é de realçar que todos os resultados foram conseguidos através de movimentos manuais, sem que houvesse qualquer sistema automatizado, pelo que pode levar a ligeiras alterações dos valores quando a pluviação for feita de forma automatizada, embora seja de crer que com diferenças pouco significativas.

Para a continuação deste projeto deve-se, numa primeira fase, analisar qual o melhor posicionamento para o sistema de pluviação, isto porque o mesmo pode deslocar-se ao longo de um comprimento de 2 m ou de 1,5 m consoante a direção do movimento de deposição de areia no tanque. É de realçar que caso se pretenda realizar um alargamento do tanque de ensaios, então será conveniente colocar o sistema de pluviação a deslocar-se ao longo do menor comprimento.

Outro aspeto que deveria ser aprofundado está relacionado com as condições de fronteira dos moldes, em que seria importante perceber qual a melhor forma de realizar os testes de pluviação de maneira a minimizar o efeito das condições de fronteira nos resultados da densidade relativa.

Por último, após a criação do sistema de pluviação à escala real, confirmar os resultados obtidos e a influência dos diversos fatores analisados nos resultados da densidade relativa dos modelos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM. (2006a). "Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table". ASTM D4253-00, *ASTM Standards* (Vol. I).
- ASTM. (2006b). "Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density". ASTM D4254-00, *ASTM Standards* (Vol. I).
- Bilé Serra J. (1998). "Experimental characterization and numerical modelling of the cyclic behaviour of granular soils. Application to earthquake engineering. PhD thesis, Lisboa Technical University.
- BS. (1990). "Methods of test for Soils for civil engineering purposes - Classification tests". *BS 1377-2*.
- Carvalho, A.T. (2012). "Resposta Sísmica de Cortinas Ancoradas. Modelação Física e Numérica". Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico.
- Coelho, P. A. L. de F., Haigh, S. K., & Madabhushi, S. P. G. (2006). "Desenvolvimento, efeitos e mitigação de liquefacção induzida por sismos: um estudo exaustivo baseado em modelação física dinâmica na centrifugadora." *Revista Geotecnia*, 107(3), 21–51.
- Dave, T. N., & Dasaka, S. M. (2012). "Assessment of portable traveling pluviator to prepare reconstituted sand specimens". *Geomechanics and Engineering*, Vol. 4, No. 2, 79-90
- E 196. (1966). "Solos - Análise granulométrica". *Especificação do LNEC*.
- Fonseca, M. P. da. (2017). "Estudo da resposta da areia de coimbra sob carregamento uniaxial". Tese de Mestrado - Especialização em Construção Urbana. ISEC
- Fretti, C., Lo Presti, D. C. F., & Pedroni, S. (1995). "A pluvial deposition method to reconstitute well-graded sand specimens." *Geotechnical Testing Journal*, 18(2), 292–298.
- Gade, V. K., Dave, T. N., Chauhan, V. B., & Dasaka, S. M. (2015). "Portable Traveling Pluviator to reconstitute specimens of cohesionless soils". *Proceedings of Indian Geotechnical Conference*.
- Gisela, M. (2012). "Análise Não Linear Da Interação Dinâmica Solo – Estaca Em Areias Secas : Um Estudo Numérico E Experimental". Tese de Doutoramento. Universidade de Lisboa
- Lo Presti, D. C. F., Berardi, R., Pedroni, S., & Crippa, V. (1993). "A new traveling sand pluviator to reconstitute specimens of well-graded silty sands". *Geotechnical Testing Journal*, 16(1), 18–26.
- Lo Presti, D. C. F., Pedroni, S., & Crippa, V. (1992). "Maximum dry density of cohesionless soils by pluviation and by ASTM D 4253-83. A comparative study". *Geotechnical Testing Journal*, 15(2), 180–189.

- Madabushi, S. P. G., Houghton, N. E., and Haigh, S. K. (2006). "A new automatic sand pourer for model preparation at Univeristy of Cambridge." *Proc., 6th International Conference on Physical Modeling in Geotechnics, Hong Kong*, 217-222.
- Matos Fernandes, M. (2006). "Mecânica dos Solos - Conceitos e Princípios Fundamentais", Vol. I, 1ª edição, Edições FEUP
- Matos Fernandes, M. (2011). "Mecânica dos Solos - Conceitos e Princípios Fundamentais", Vol. I, 2ª edição, Edições FEUP
- Miura, S., & Toki, S. (1982). "A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand". *Soils and Foundations*, 22(1), 61–77.
- NP 83. (1965). "Solos - Determinação da densidade das partículas sólidas". *Norma Portuguesa Definitiva*.
- Oliveira, F., Freitas, A., Morais, P., Mendes, B., Carvalho, A. T., & Bilé Serra, J. (2012). "A Travelling Sand Pluviator To Reconstruct Large". *15th International Conference on Experimental Mechanics PAPER, 1*, 1–16.
- Portugal J. C. (1998) – "Modelação física com centrifugadora". Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Portugal
- Santos, L. N. (2009). "Comportamento da Areia de Coimbra sob Carregamento Monotónico". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Santos, P. A. D. (2015). "Caracterização da Rigidez Inicial de Areias Utilizando Bender Elements". Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra
- Serra, J. B. e Caldeira, L. (1997). "Resposta sísmica de camadas de solo por meio de uma abordagem estocástica". *Geotecnia – Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, nº 81, pp. 51-63
- Stringer, M. E., Pedersen, L., Nuss, B. D., & Wilson, D. W. (2014). "Design and use of a rotating spiral pluviator for creating large sand models". *Physical Modelling in Geotechnics*, 253–258.
- Vaid, Y. P., & Negussey, D. (1984). "Relative density of pluviated sand samples". *Soils and Foundations*, 24(2), 101–105.
- Zhao Y., Gafar K., Elshafie M. Z. E. B., Deeks A. D., Knappett, J. A. & Madabushi S. P. G. (2006). "Calibration and use of a new automatic sand pourer". *Int. Conf. on Physical Modelling in Geotechnics, Hong Kong, 3–8 August 2006*, 265–270.