

Validação do compactador de Harvard no estudo da compactação de solos

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil – Especialização em Construção Urbana

Autora

Sara Patrícia Galveias Lopes

Orientadores

Prof. Doutor Carlos Manuel da Cruz Moreira

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Mestre Luís Manuel Araújo Santos

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, dezembro, 2014

AGRADECIMENTOS

Embora uma dissertação seja, pelo seu carácter académico, um trabalho individual, há contributos de natureza diversa que não podem nem serão esquecidos.

Em primeiro, e acima de tudo, expresso o meu agradecimento aos meus pais, pelo inestimável apoio familiar e orgulho com que sempre reagiram aos meus resultados académicos. E por mil e uma coisas que tornariam este parágrafo maior que toda a dissertação que escrevi.

Ao meu namorado, Samuel, pelo seu carinho, disponibilidade, pelo estímulo a crescer científica e pessoalmente e por se ter tornado ao longo do tempo o meu porto seguro.

Estou de uma forma distinta, agradecida ao Professor Doutor Carlos Moreira, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Civil (DEC) do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC) e ao Mestre Luís Santos, Assistente convidado, pela orientação científica deste trabalho, pelo conhecimento transmitido, e sobretudo pelo seu empenho e dedicação tão característico dos professores desta instituição.

Devo, ainda, ao Professor Luís Santos, a minha formação na área de geotecnia, ao longo da qual conseguiu inculcar-me o desejo de realizar este estudo. Um especial obrigado por acreditar nas minhas capacidades.

Manifesto também o meu agradecimento ao Engenheiro Técnico Carlos Renato, Técnico do Laboratório de Pavimentos do DEC-ISEC, pela ajuda indispensável prestada na realização de grande parte dos trabalhos experimentais, e em especial pela amizade que ficou. Não me vou esquecer.

Agradeço à minha colega Laura Jorge por me fornecer um dos solos utilizados. Destaco a Laura como uma amiga e modelo a seguir.

À minha colega Daniela pela sua disponibilidade e ajuda.

A todas as minhas colegas e amigas, Andrea, Rossana, Vânia e Helena, simplesmente por serem umas imprescindíveis “companheiras de guerra”.

À dona Elisabete por ter partilhado muito da sua agradável companhia e ao técnico António Amaral pela sua boa disposição.

Por fim dedico esta dissertação ao meu irmão João, com a expectativa de que a seriedade e o empenho que aqui depositei lhe possa servir de estímulo para fazer sempre “mais e melhor”. É com grande estima que lhe agradeço todo o seu entusiasmo relativo a este estudo e o simples facto de ser o meu irmão mais novo, o que incutiu em todo o meu percurso académico a trabalhar sempre mais para lhe poder transmitir o que aprendi.

RESUMO

Ensaio anteriormente efetuados indicam que não existe nenhum procedimento recorrente em laboratório, que permita reproduzir adequadamente a compactação de campo. Como tal, surgiu na década de cinquenta do século passado, um equipamento de compactação de utilização manual que oferecia vantagens na realização de ensaios envolvidos em qualquer investigação ou trabalhos referentes à compactação de solos. Este permite a redução em termos de material, trabalho e tempo despendido e as suas reduzidas dimensões tornam-no portátil, com a possibilidade de ser utilizado para ensaios em campo. O equipamento designa-se por Compactador Miniatura de Harvard e o método de compactação que lhe está associado permite, segundo Wilson (1950), reproduzir com uma maior precisão a ação do cilindro pés-de-carneiro, utilizado frequentemente em obra sobre solos coesivos. Porém, para tal é necessário definir uma adequada combinação de molas, número de camadas e pressões por camada de forma a reproduzir com o compactador miniatura de Harvard valores aproximados aos valores que se obtêm tradicionalmente com o compactador de Proctor.

Na presente dissertação apresentam-se os estudos realizados com o objetivo de completar as investigações promovidas anteriormente, por forma a desenvolver um procedimento adequado e possível de ser utilizado por entidades, não só em trabalhos laboratoriais como de campo.

Palavras-chave: Compactador de Harvard; solos coesivos; compactação; laboratório.

ABSTRACT

Tests performed in the past indicate that no standard procedure adequately reproduces field compaction.

In the 1950's a compaction apparatus came out, based on a kneading action which offers some advantages in soil compaction tests procedure.

It allowed the reduction in labor, time and quantity of material required, and its dimensions made it portable, which allowed its use in field compaction tests.

This equipment, named Harvard Miniature Compaction Apparatus, establishes a new method of compaction, which duplicates more closely the kneading action of sheepfoot roller commonly used in cohesive soils.

By a suitable selection of springs, number of layers, and tamps per layer it is possible to reproduces Proctor compaction values.

This dissertation presents some tests necessary to supplement the past promoted investigations, in order to develop an appropriate procedure that can be used by entities in laboratory or field test.

Keywords: Harvard miniature; cohesive soils; procedure; laboratory.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE QUADROS	xv
ACRÓNIMOS	xix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos e metodologia do trabalho	2
1.3. Organização do trabalho	3
2. COMPACTAÇÃO EM SOLOS COESIVOS	5
2.1. Solos coesivos.....	5
2.1.1. Mineralogia das Argila	5
2.1.2. Mecanismos de interação entre argilas e água.....	7
2.1.3. Propriedades das Argilas	9
2.1.4. Estrutura dos solos coesivos	12
2.2. Compactação.....	15
2.2.1. Confronto de conceitos	15
2.2.2. Influência do teor em água na compactação.....	15
2.2.3. Influência da energia de compactação	16
2.2.4. Influência da granulometria na compactação	17
2.2.5. Comportamento dos solos coesivos face à compactação	18
2.2.6. Compactação no ramo seco ou no ramo húmido.....	19
3. ENSAIOS LABORATORIAIS PRELIMINARES	22
3.1. Materiais	22
3.2. Ensaios de Identificação de Solos.....	25
3.2.1. Densidade das partículas	25
3.2.2. Análise granulométrica (E 196 – 1966).....	26
3.2.3. Limites de Consistência.....	27
3.2.4. Classificação de Solos para fins rodoviários	27
3.2.5. Classificação Unificada	27
3.3. Equipamentos utilizados	27
4. COMPACTADOR MINIATURA DE HARVARD	30
4.1. Equipamento	30

4.1.1.	Montagem do equipamento.....	33
4.2.	Procedimento.....	36
4.2.1.	Procedimento original proposto por Wilson	36
4.2.2.	Procedimento proposto por State of Nevada Department of Transportation: Materials Division.....	37
4.2.3.	Procedimento proposto: MCH-ISEC/2014	37
4.3.	Cuidados a ter.....	43
4.4.	Energia de compactação	43
4.4.1.	Lei de Hooke	43
4.4.2.	Energia mecânica total no Movimento Harmónico Simples	47
4.4.3.	Determinação da Energia de compactação através de Harvard	49
4.4.4.	Comparação com Proctor.....	54
4.5.	Influência do operador na compactação	55
5.	RESULTADOS DA COMPACTAÇÃO	57
5.1.	Ensaio de Proctor	57
5.1.1.	Resultados dos ensaios.....	57
5.1.2.	Comentários adicionais aos ensaios de compactação de Proctor.....	61
5.2.	Estudo paramétrico do ensaio de Harvard.....	62
5.2.1.	Definição do número de pressões	62
5.2.2.	Problemática das molas na compactação leve e pesada.....	65
5.2.3.	Definição do número de camadas	66
5.2.4.	Conclusão do estudo paramétrico	67
5.3.	Ensaio de Harvard.....	68
5.3.1.	Comparação de resultados	68
5.4.	Comparação entre ensaios de Proctor e Harvard.....	71
6.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	74
6.1.	Conclusão	74
6.2.	Trabalhos futuros.....	76
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Comparação entre curvas de compactação (Wilson, Small soil compaction apparatus duplicated field results closely, 1950)	1
Figura 2.1 - (a) Tetraedro de silício, (b) Folha tetraédrica ou estrutura de Filossilicatos (Das, 1941)	5
Figura 2.2 - (c) Octaedro de alumínio, (d) Folha octaédrica ou estrutura de Gibbsite (Das, 1941)	6
Figura 2.3 - Folha de Filossilicatos-Gibbsite (Das, 1941)	6
Figura 2.4 - (a) Dupla camada difusa, (b) Distância a partir da partícula de argila (Das, 1941)	7
Figura 2.5 - Dipolo de água (Das, 1941)	8
Figura 2.6 - Classificação dimensional das partículas existentes nos solos (Correia & Almeida da Benta, 2007)	10
Figura 2.7 - (A) Expansão intercrystalina do mineral de argila, (B) Expansão intracrystalina do mineral de argila (Correia & Almeida da Benta, 2007)	11
Figura 2.8 - Estrutura Dispersa (Das, 1941)	13
Figura 2.9 - Estrutura Floculada (Das, 1941)	13
Figura 2.10 - Estrutura orientada (Das, 1941)	13
Figura 2.11 - Microestrutura argilosas: (a) arranjo de partículas e macroporos; (b) arranjo de domínios e aglomerados (Das, 1941)	14
Figura 2.12 - Curva de compactação de um solo coesivo (Melo & Ferreira, 1981)	15
Figura 2.13 - Família de curvas de compactação relativas a um mesmo solo e a um mesmo método de compactação para diferentes níveis de energia (Melo & Ferreira, 1981)	16
Figura 2.14 - Curvas de compactação de solo com diferentes percentagens de partículas grossas (Moreira, 2008)	17
Figura 2.15 - Curva de compactação de um solo argiloso abrangendo a zona de teores em água próximos de zero (Melo & Ferreira, 1981)	18
Figura 2.16 - Curva de Compactação de um solo argiloso (Melo & Ferreira, 1981)	19
Figura 3.1 - Marcador do local do solo “Hospital Pediátrico” através Google Earth.	23
Figura 3.2 - Marcador do local do “Solo B” através Google Earth.	23
Figura 3.3 - Marcador do local do solo “Ladeiras” através Google Earth.	24
Figura 3.4 - Marcador do local do solo “Zona Industrial” através Google Earth.	24
Figura 3.5 - Marcador do local do solo “Ribeirinha” através Google Earth.	25
Figura 3.6 - Curvas granulométricas de todos os solos.	26

Figura 4.1 - Elementos que constituem o molde: (a) Molde; (b) Anel da base; (c) Alonga; (d) Peças de topo e base, roscadas nas extremidades. Elementos que integram o suporte do molde: (e) varas de ligação entre as peças de topo e base; (f) Porcas para apertar o conjunto.	30
Figura 4.2 - Acessórios que integram o martelo.	31
Figura 4.3 - Molas existentes com respetivo espaçador. Mola de 20 lb a amarelo, mola de 37,5 lb a cinzento e mola de 40 lb a vermelho.	31
Figura 4.4 - Aparelho para remover a alonga e desmoldar a amostras.	32
Figura 4.5 - (a) Aparelho de frente; (b) Pormenor de como se retira a alonga; (c) Pormenor de como o aparelho desmolda a amostra.	32
Figura 4.6 - Sequência de montagem da esquerda para a direita	33
Figura 4.7 - Sequência de montagem da esquerda para a direita	34
Figura 4.8 - Sequência de montagem da esquerda para a direita.	35
Figura 4.9 - À esquerda, cordão de solo a dividir em porções equivalentes ao número de camadas. À direita, solo introduzido dentro do molde.	39
Figura 4.10 - Compactação do solo com o martelo de Harvard. Pormenor da verticalidade que é necessária manter.	39
Figura 4.11 - Sequência de pressões adotada: à esquerda a primeira fase; à direita a segunda fase.	40
Figura 4.12 - Pormenor da remoção da alonga.	40
Figura 4.13 - Acabamentos dos topos da amostra.	41
Figura 4.14 - Pesagem do molde.	41
Figura 4.15 - Extração da amostra do interior do molde.	41
Figura 4.16 - Pormenor da amostra extraída.	42
Figura 4.17 - Frações da amostra compactada a excluir (a sombreado) e frações a aproveitar (a branco).	42
Figura 4.18 - Em primeiro, corte do solo nas frações mencionadas. Seguidamente, colocação das amostras em cápsulas e pesagem das mesmas.	42
Figura 4.19 - Sistema massa-mola (adaptado de Nussenzveig, 1997)	44
Figura 4.20 - Lei de Hooke. (Nussenzveig, 1997)	44
Figura 4.21 - Lei de Hooke (adaptado de Nussenzveig, 1997)	45
Figura 4.22 - Energia potencial do oscilador harmónico. (Nussenzveig, 1997)	46
Figura 4.23 - Função seno	46
Figura 4.24 - Evolução temporal de x , v , E_p e E_c . (Nussenzveig, 1997)	48
Figura 4.25 - Sistema massa-mola em intervalos de $1/4$ de período. (Nussenzveig, 1997)	48
Figura 4.26 - Esquerda: Esquema estrutural do posicionamento da mola; Direita: Reprodução do esquema em laboratório.	49
Figura 4.27 - Esquema de leitura indireta da deformação das molas. À esquerda, esquema do martelo na posição de equilíbrio. À direita, esquema do martelo sobre compressão.	50
Figura 4.28 - Esquerda: Leitura indireta da deformação das molas em laboratório. Direita: Pormenor dos pesos acima do martelo.	51
Figura 4.29 - Lei de Hooke para as molas 20 lb e 40 lb.	53

Figura 4.30 - Energia Potencial elástica para as molas 20 lb e 40 lb	53
Figura 4.31 - Comparação entre curvas de compactação de cada operador para a mola de 40 lb.	56
Figura 5.1- Curvas de compactação leve e pesada de Proctor, respetivamente, à esquerda e à direita.	57
Figura 5.2 - Curvas de compactação leve de Proctor e variação de γ_d com W para os graus de saturação, S , 100%, 90% e 80%	60
Figura 5.3 - Curvas de compactação pesada de Proctor e variação de γ_d com W para os graus de saturação, S , 100%, 90% e 80%	60
Figura 5.4 - "Cortina" de solo em torno das paredes do molde em consequência de um elevado teor em água.	62
Figura 5.5 - Comparação entre a evolução do peso específico seco com o n.º pressões para as diferentes molas.	63
Figura 5.6 - Superfície da amostra compactada com a mola de 20 lb com 10 pressões em 15 segundos, 20 pressões em 30 segundos, 30 pressões em 45 segundos, 40 pressões em 60 segundos.	64
Figura 5.7 - Acabamento da superfície lateral da amostra compactada com a mola de 20 lb com 30 pressões.	65
Figura 5. 8 - Curvas de Compactação em Harvard para ambas as molas de 20 (com 4 e 5 camadas) e de 40 lb (com 5 e 6 camadas).	69
Figura 5. 9 - Curvas de Compactação em Harvard para ambas as molas de 20 e 40 lb e em Proctor leve e pesado.	71

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 - Listagem dos objetivos com a respetiva metodologia adotada na sua concretização.	2
Quadro 3.1 - Localização dos solos utilizados	22
Quadro 3.2 - Densidade das partículas	25
Quadro 3.3 - Interpretação da Análise granulométrica.	26
Quadro 3.4 - Limites de Consistência ao abrigo da NP 143 – 1969	27
Quadro 3.5 - Classificação de Solos para fins rodoviários segundo E 240 - 1970	27
Quadro 3.6 - Classificação Unificada segundo ASTM 2487 - 85	27
Quadro 3.7 - Modalidades dos ensaios de compactação segundo LNEC, E 197 – 1966	28
Quadro 4.1 - Registo das medidas efetuadas ilustradas pela Figura 4.27	50
Quadro 4.2 - Cálculo da Energia de Compactação.	51
Quadro 4.3 - Valores referentes à mola de 20 lb	52
Quadro 4.4 - Valores referentes à mola de 40 lb	52
Quadro 4.5 - Energia de compactação em Harvard e Proctor	54
Quadro 4.6 - Resultados obtidos por cada operador para a mola de 40 lb.	55
Quadro 4.7 - Coordenadas do ponto máximo das curvas de compactação de cada operador para a mola de 40 lb	56
Quadro 5.1 - Valores de teor em água ótimo e peso específico seco máximo de cada solo, obtidos na compactação leve de Proctor.	59
Quadro 5.2 - Coeficiente de determinação das curvas de compactação de cada solo.	59
Quadro 5.3 - Valores de referência para o solo “Hospital Pediátrico”.	62
Quadro 5.4 - Resultado do número de pressões para as molas de 20 lb, 37,5 lb e 40 lb.	63
Quadro 5.5 - Percentagem de erro do peso específico seco calculado para todas as molas.	64
Quadro 5.6 - Resultados da compactação com Harvard com $w_{opt, leve} \approx 12,68\%$.	65
Quadro 5.7 - Resultados da compactação com Harvard com $w_{opt, pesada} \approx 9,40\%$.	65
Quadro 5.8 - Análise da variação do peso específico seco com o número de camadas para compactação pesada.	66
Quadro 5.9 - Análise da variação do peso específico seco com o número de camadas para compactação leve.	67
Quadro 5.10 - Resumo do ensaio paramétrico efetuado através do solo "Hospital Pediátrico" para definição do n.º de pressões, das molas para cada compactação e do n.º de camadas.	68
Quadro 5.11 - Coeficiente de determinação, r^2 , das curvas de compactação de cada solo para a mola de 20 lb e de 40 lb.	70

Quadro 5.12 - Coordenadas do ponto máximo de cada curva de compactação para a mola de 20 lb e 40lb.	70
Quadro 5.13 - Coordenadas do ponto máximo de cada curva de compactação para a mola de 20 lb no ensaio de Harvard e para a compactação leve de Proctor	72
Quadro 5.14 - Coordenadas do ponto máximo de cada curva de compactação para a mola de 40 lb no ensaio de Harvard e para a compactação pesada de Proctor	72
Quadro 5.15 - Diferença em percentagem entre pesos específicos secos	73

SIMBOLOGIA

% – Percentagem

cm^3 – Centímetro cúbico

mm – Milímetro

μm – Micrómetro

m – Metro

m/s^2 – Metro por segundo quadrado

° – Ângulo em graus

J – Joules

N – Newton

N/m – Newton por metro

Kg - Quilogramas

g - Gramas

g/cm^3 – Grama por centímetro cúbico

lb – Libras

lb/cu.ft - Libras por pé cúbico

VA – Soma dos potenciais atrativos

VB - Soma dos potenciais repulsivos

IP – Índice de plasticidade

w – Teor em água

w_{opt} – Teor em água ótimo

w_x - Teor em água ótimo relativos ao ponto “x”

d – Distância

F_s – Força elástica

k – Constante elástica

x – Deslocamento

a – Aceleração

A – Amplitude máxima de oscilação

ω – Frequência angular

O – Origem do gráfico da energia potencial de um oscilador harmónico

E – Energia

$E_{1,2,3,i}$ – Níveis de energia

E_c – Energia cinética

E_m – Energia mecânica

E_p – Energia potencial

F – Força

r^2 – Coeficiente de determinação

W_p – Peso do martelo de Proctor

h – Altura de queda

n – N.º de pressões

c – N.º de camadas

V – Volume do molde pequeno de Proctor

v – Velocidade instantânea da partícula

φ – Fase do movimento

φ_0 – Fase do movimento no instante inicial

$\gamma_{d, x}$ - Peso específico seco relativos ao ponto “x”

$\gamma_{d, \text{máx}}$ – Peso específico seco máximo

γ_d – Peso específico seco

ACRÓNIMOS

ASCE – American Society of Civil Engineers

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

ASTM – American Society for Testing and Materials Test Designation

AASHTO – American Association of State Highway Officials

ST DMTD – State of Nevada Department of transportation: Materials Division

NP – Norma Portuguesa

E – Especificação do LNEC

IC1 – Itinerário complementar 1

MHS – Movimento harmónico simples

MCH – Método de Compactação de Harvard

ISEC – Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Em Novembro de 1950, Stanley D. Wilson, professor assistente de Mecânica dos Solos e Fundações da Universidade de Harvard, publicou na *Engineers News – Record* um artigo no qual descrevia um procedimento de compactação em laboratório alternativo, que superava em grande escala as objeções levantadas pelos equipamentos existentes na data, em termos de tempo, de esforço e de quantidade de material requerida. Segundo este autor, o aparelho de compactação que apresentava permitia a operadores inexperientes obter dados para constituir duas curvas de compactação numa tarde, podendo um técnico experiente obter até seis curvas em 4 horas. Esta eficiência contrastava com as muitas horas de trabalho árduo requeridas para obter uma curva aceitável usando o ensaio de Proctor modificado.

A redução em trabalho e quantidade de material requerido era motivo suficiente para que o ensaio fosse considerado vantajoso para engenheiros e laboratórios envolvidos em qualquer investigação ou trabalhos referentes à compactação de solos. Além disso, o aparelho implicava um novo método que reproduzia com maior precisão a ação do cilindro pés-de-carneiro, utilizado frequentemente em obra sobre solos coesivos (Wilson, 1950).

Wilson (1950) descreve uma investigação onde se comparam dois solos cujas características de compactação em campo foram extensivamente estudadas pela Waterways Experiment Station. Para os dois solos, areia argilosa (“clayey sand”) e argila siltosa (“silty clay”) são apresentadas curvas de compactação obtidas através de: ensaio de Proctor, ensaio de Proctor modificado, Método Estático 2000 psi, compactação em campo e ensaio com a miniatura de Harvard.

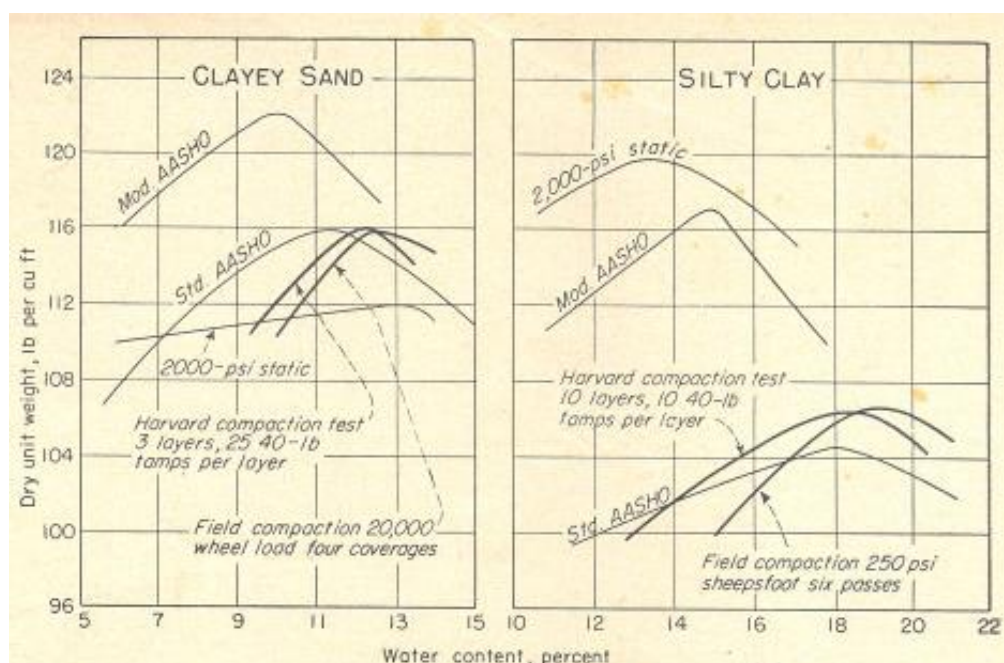


Figura 1.1 - Comparação entre curvas de compactação (Wilson, Small soil compaction apparatus duplicated field results closely, 1950)

Como se pode averiguar pela Figura 1.1 é possível, através de uma adequada combinação de molas, número de camadas e número de pressões por camada, obter uma curva de compactação que melhor se ajusta à compactação de campo do que os outros métodos de laboratório, dinâmicos e estáticos. Todavia, os ensaios indicam que não existe nenhum procedimento recorrente que reproduza adequadamente a compactação de campo para todos os tipos de solo (Wilson, 1950).

Esta primeira publicação pretendia incitar outros a construir ou modificar o aparelho e a conduzir investigações semelhantes com outros solos. O professor Arthur Casagrande sugeriu primeiramente o uso da miniatura de Harvard e contribuiu com valiosas sugestões para aprimorar o aparelho (Wilson, 1950).

1.2. Objetivos e metodologia do trabalho

De um modo geral, a presente dissertação pretende validar o uso do compactador de Harvard na avaliação da compactação de solos coesivos. Para o devido efeito destaca-se uma sequência de trabalhos experimentais que conduzirão à concretização do objetivo final.

Quadro 1.1 - Listagem dos objetivos com a respetiva metodologia adotada na sua concretização.

OBJETIVO	METODOLOGIA
Caracterização dos solos utilizados	Recurso a ensaios de identificação para posterior classificação.
Avaliação das características de compactação dos solos.	Realização de ensaios de Proctor.
Determinação do procedimento a utilizar nos ensaios de compactação de Harvard	Estudo teórico dos procedimentos de compactação existentes e seleção da metodologia mais adequada a utilizar.
	Estudo experimental paramétrico para definir os parâmetros relevantes que possam influenciar a compactação.
	Avaliação da energia mecânica total imprimida no solo considerando que o equipamento é manual.
Repetibilidade do comportamento dos solos face ao procedimento definido para o ensaio de Harvard	Aplicação do procedimento definido para a compactação de Harvard e caracterização da compressibilidade dos solos através das curvas de compactação obtidas.
Comparação com os Ensaios de Proctor	Análise das curvas de compactação obtidas com os dois aparelhos de compactação: Harvard e Proctor.

1.3. Organização do trabalho

A dissertação é constituída por seis capítulos cuja organização e conteúdo aqui se sintetizam. Este capítulo introdutório integra a sinopse do tema abordado e apresenta o seu enquadramento. Ainda são expostos os objetivos a atingir com o estudo elaborado no âmbito desta dissertação assim como a metodologia a empregar com vista a atingir os objetivos previstos. Por último, descreve-se a organização do trabalho.

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre compactação em solos coesivos. Numa primeira fase são abordados os solos coesivos numa perspetiva mineralógica e estrutural, expondo não só a mineralogia das argilas mas também as relações interpartículas associadas às mesmas e as suas propriedades. Neste capítulo apresentam-se ainda aspetos referentes à compactação na generalidade, enunciando-se a influência do teor em água, da energia de compactação e da granulometria entre outros aspetos que possam ser úteis na compreensão do estudo efetuado.

O capítulo 3 é inteiramente dedicado às ferramentas de estudo desta dissertação. Introduzem-se os solos utilizados, dando especial ênfase aos locais de recolha bem como aos ensaios de identificação realizados com vista à sua classificação. Enunciam-se ainda os equipamentos utilizados, nomeadamente o compactador de Proctor e Harvard. Grande parte do estudo desta dissertação é relativo ao compactador de Harvard, no entanto neste capítulo apresenta-se apenas o compactador de Proctor.

O capítulo 4 dedica-se exclusivamente ao compactador Miniatura de Harvard. Este equipamento é apresentado e descreve-se cada elemento que o constitui. Seguidamente, enunciam-se 3 procedimentos de ensaio: o proposto por Wilson (1950); o proposto e utilizado pelo State of Nevada Department of transportation: Materials Division (2009) e o proposto no âmbito da tese. Este último baseia-se nos dois anteriores, sendo pontualmente complementado com aspetos do procedimento de compactação de Proctor. Por ser o método adotado na presente dissertação, enunciam-se ainda os cuidados a assegurar durante o mesmo. É também apresentado um estudo experimental realizado no sentido de avaliar a energia mecânica total imprimida no solo por este equipamento e os aspetos relevantes para o efeito, relacionados com a lei de Hooke, o movimento harmónico simples, entre outros. Finalmente, comparam-se a energia de compactação dos ensaios de Harvard e Proctor, averiguando também a influência do operador na compactação em Harvard.

O capítulo 5 remete para os trabalhos experimentais efetuados e os resultados obtidos, numa primeira fase, nos ensaios de compactação de Proctor. Em seguida, expõe-se todo o trabalho experimental e resultados envolvidos no estudo paramétrico usado para complementar o procedimento proposto no âmbito da tese em termos do número de pressões, camadas e escolha da mola a adotar consoante o grau de compactação pretendido. Por fim, apresentam-se os resultados obtidos na compactação de Harvard.

No capítulo 6 estabelece-se a síntese do estudo desenvolvido com as conclusões gerais. São ainda indicadas sugestões para a realização de trabalhos futuros que possam complementar o estudo desenvolvido no âmbito da presente dissertação.

2. COMPACTAÇÃO EM SOLOS COESIVOS

2.1. Solos coesivos

O comportamento de um solo, designadamente as suas características de resistência ao corte, deformabilidade e permeabilidade, dependem, entre outros aspetos, do seu índice de vazios. Quanto menor ele for, maior será a resistência ao corte do solo em apreço e menores serão a deformabilidade e permeabilidade. A redução do índice de vazios de um solo pode ser conseguida pela ação da compactação.

Os solos coesivos ou argilosos distinguem-se pelo seu comportamento plástico e pela evolução do mesmo face a uma vasta gama de teores de água. Comparados com outros materiais, estes apresentam um elevado índice de plasticidade. Contudo, importa compreender os aspetos relacionados com a constituição mineralógica dos seus componentes e as forças interpartículas que regem o comportamento mecânico dos solos.

2.1.1. Mineralogia das Argila

Segundo Das (1941), as “argilas” são, do ponto de vista mineralógico, complexos silicatos de alumina hidratados compostos por duas unidades estruturais básicas, designadamente: tetraedro de sílica e octaedro de alumínio.

Uma unidade de tetraedro consiste em quatro átomos de oxigénio ligados em torno de um átomo de sílica. A combinação de cada unidade tetraédrica resulta numa camada ou folha, que se repete continuamente seguindo duas direções no espaço. Desta forma constitui a estrutura de Filossilicatos (Figura 2.1).

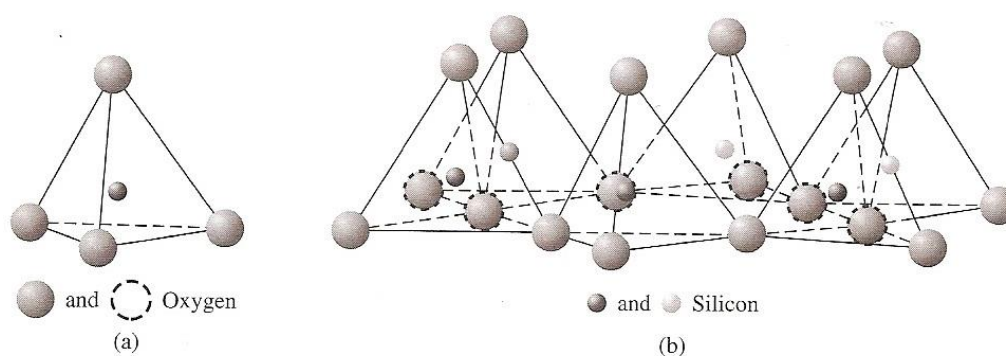


Figura 2.1 - (a) Tetraedro de silício, (b) Folha tetraédrica ou estrutura de Filossilicatos (Das, 1941)

A unidade octaédrica, por sua vez, consiste em seis grupos hidroxilos em torno de um átomo de alumínio. A combinação de cada octaedro de alumínio resulta numa camada semelhante à anteriormente referida, porém denominada por estrutura de Gibbsite $[\text{Al}_2(\text{OH})_6]$ (Figura 2.2).

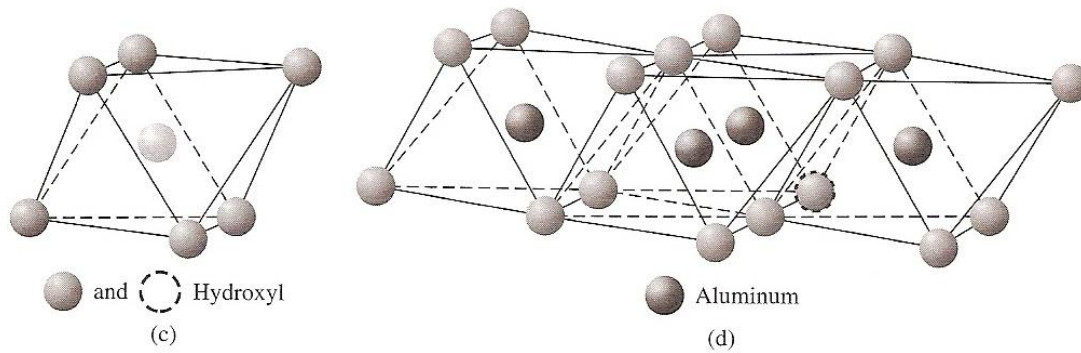


Figura 2.2 - (c) Octaedro de alumínio, (d) Folha octaédrica ou estrutura de Gibbsite (Das, 1941)

Geralmente, os átomos de alumínio são substituídos por átomos de magnésio nas unidades octaédricas, no entanto a camada contínua resultante de octaedros de magnésio designa-se por estrutura de brucite [$\text{Mg}_3(\text{OH})_6$] (Figura 2.3).

Ambas as estruturas, tetraédrica e octaédrica, podem formar camadas heterogêneas originando uma variedade de silicatos de alumina hidratados em camada (folha) ou em cadeias (fitas).

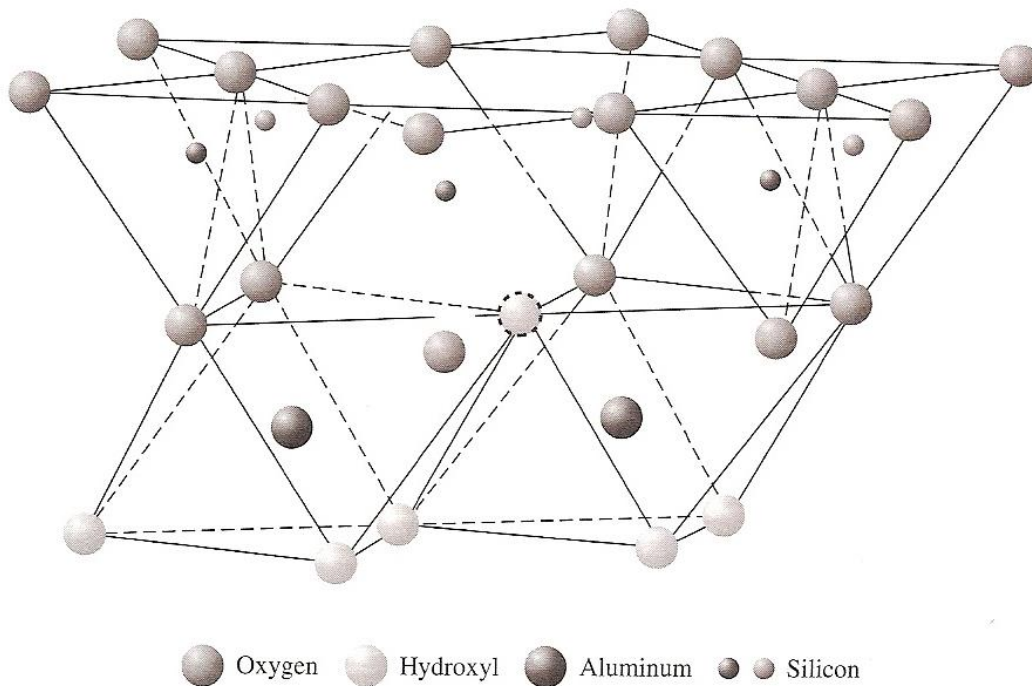


Figura 2.3 - Folha de Filossilicatos-Gibbsite (Das, 1941)

Combinações diferentes entre estas estruturas originam várias estruturas minerais de argila nomeadamente Caulinite, Illite e Montmorilonite.

Sobre este tema não será acrescentada mais informação, importa sim salientar, de uma forma muito simplificada, que a estrutura das partículas de argila confere-lhe uma geometria do tipo lamelar (Melo & Ferreira, 1981) e que estas se encontram carregadas negativamente nas faces e positivamente nos bordos (Cruz, 2009).

2.1.2. Mecanismos de interação entre argilas e água

Em argilas secas, a carga negativa das faces da partícula lamelar é equilibrada por catiões de permuta, como íons cálcio (Ca^{2+}), íons magnésio (Mg^{2+}), íons sódio (Na^+), e íons potássio (K^+). Estes envolvem as partículas de argila através de atração electrostática. Os catiões excedentes e os aniões associados precipitam sob a forma de sais (Das, 1941)

Quando a argila entra em contacto com a água os sais precipitados dissolvem-se na solução aquosa fazendo com que a concentração de íons aumente na solução. Estes íons, catiões e alguns aniões, ficam dispersos em torno das partículas de argila formando uma dupla camada difusa (Correia & Almeida da Benta, 2007; Das, 1941).

Nesta sequência verifica-se o aumento da concentração de catiões junto às faces relativamente à solução aquosa envolvente, e a tendência para que ocorra a difusão de catiões próximos destas para o meio envolvente. Este fenómeno ocorre por forma a equilibrar a concentração de catiões aí existente. Contudo as cargas negativas das argilas exercem forças de atração, e continuam a atrair catiões, restringindo a difusão (Correia & Almeida da Benta, 2007)

Como tal ocorre o equilíbrio entre a tendência para a difusão de catiões numa solução aquosa e o efeito oposto de atração gerado pelo campo eletronegativo na superfície (Correia & Almeida da Benta, 2007).

A dupla camada difusa é formada assim pelas cargas elétricas à superfície e as cargas distribuídas pela solução adjacente (Figura 2.4).

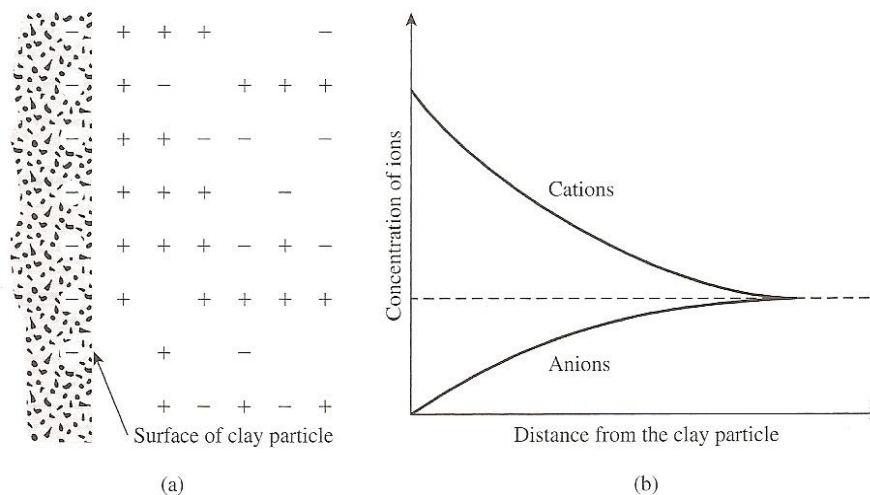


Figura 2.4 - (a) Dupla camada difusa, (b) Distância a partir da partícula de argila (Das, 1941)

As moléculas de água são polares. Os átomos de hidrogénio não estão posicionados simetricamente em torno dos átomos de oxigénio formando um ângulo de 105° aproximadamente (Figura 2.5). Como tal uma molécula de água dispõem de cargas positivas num lado e negativas noutro, o que se reconhece por dipolo (Das, 1941).

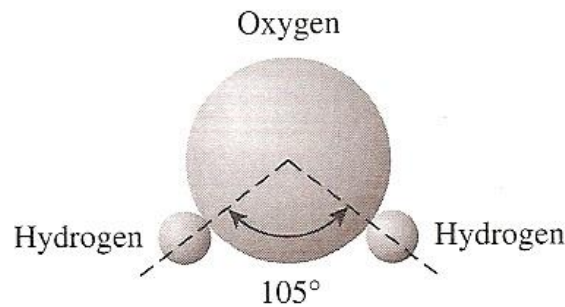


Figura 2. 5 - Dipolo de água (Das, 1941)

Destacam-se vários mecanismos pelos quais estes dipolos de água são atraídos para as partículas de argila:

- os dipolos de água são atraídos pela eletronegatividade da carga faces de uma partícula de argila seca. Estes tendem a orientar-se com os polos positivos no sentido da carga negativa da superfície da partícula e como tal são atraídos para as mesmas nessas condições (Das, 1941; Correia & Almeida da Benta, 2007)

- a atração dos catiões de permuta presentes na dupla camada difusa e o lado do dipolo que o neutraliza consiste noutro mecanismo. Estes catiões hidratam-se envolvendo-se em moléculas de água e quanto menor for a sua dimensão e elevada carga, maior é a hidratação. Desta forma estes catiões influenciam a adsorção de água, consistindo num fenómeno importante quando se lida com baixos teores em água (Das, 1941; Correia & Almeida da Benta, 2007).

- um terceiro mecanismo pelo qual a água é atraída em direção às partículas de argila fundamenta-se no efeito das pontes/ligações de hidrogénio, onde os átomos de hidrogénio das moléculas de água são partilhados por átomos de oxigénio na face da argila. Também ocorrem ligações de hidrogénio entre os dipolos de água e os grupos hidroxilo (Das, 1941; Correia & Almeida da Benta, 2007).

- Atração por osmose é um mecanismo que ocorre em resposta a uma maior concentração de iões junto à face, sobretudo catiões. A difusão de água, osmose, ocorre no sentido do gradiente de concentração, isto é, da zona com menos concentração para a zona com mais diluindo a dupla camada difusa. Com este fenómeno a concentração de iões na vizinhança aumenta e diminui junto à face. Porém, este mecanismo de atração de moléculas de água é limitado pela atração de catiões pelas cargas eletronegativas das faces. Assim a difusão de iões é restringida e a difusão osmótica também (Das, 1941; Correia & Almeida da Benta, 2007).

- Outro mecanismo consiste na atração por forças Van der Waals. Quando aumenta a distância entre duas partículas os campos elétricos não interferem e estas dispersam-se no meio aquoso sem se verificarem consideráveis fenómenos de interação. No entanto, quando a distância diminui, os campos elétricos interferem e a aproximação das duas partículas processa-se segundo leis que entram em linha de conta com fenómenos de atração e repulsão. Atua uma força repulsiva de origem elétrica que tende a manter afastadas as partículas. E em simultâneo existe uma força atrativa entre as partículas de argila causada pelas forças Van der Waals. (Melo & Ferreira, 1981)

Estas forças Van der Waals contribuem para atração de dipolos de água (Correia & Almeida da Benta, 2007).

Todos os mecanismos de atração entre água e argila diminuem com a distância à superfície das partículas. Toda a água adsorvida, isto é fortemente atraída à partícula, é denominada por dupla camada de água (Das, 1941).

A orientação das moléculas de água em torno das partículas de argila confere aos solos coesivos as suas propriedades plásticas.

O comportamento de um conjunto de partículas argilosas deve ser avaliado considerando não só as partículas sólidas de argila mas também todo o conjunto que a rodeia formando a dupla camada difusa, e que se encontra associado a estas através de forças de origem elétrica (Das, 1941).

2.1.3. Propriedades das Argilas

2.1.3.1. Coesão

De uma forma geral, coesão pode definir-se como a resistência ao corte de um solo, quando sobre ele não atua qualquer pressão externa (Vargas, 1977).

Esta resistência pode ter três origens (Vargas, 1977) no efeito da existência de um “cimento natural” conseguido por partículas finas coaguladas entre as maiores, que aglutina as partículas do solo entre si;

- no efeito da eventual ligação entre partículas, próximas umas das outras, exercida pelo potencial atrativo de natureza molecular ou coloidal. Este potencial atrativo também exerce pressão sobre a água intersticial. Forma-se, então, uma camada de água adsorvida envolvendo as partículas, que sofrendo enormes pressões, se encontra no estado sólido. Este tipo de coesão designa-se por “coesão verdadeira”. O seu valor depende da natureza mineralógica da fração argilosa, dos iões adsorvidos na superfície das partículas e da existência de um espaço interlamelar adequado (Vargas, 1977);

- outra origem, por efeito da pressão capilar na água intersticial, quando o solo sofre um esforço de rotura. As partículas tendem a mover-se umas em relação às outras, formando-se meniscos capilares entre os seus pontos de contacto. As partículas são pressionadas umas contra as outras pelo efeito da tensão superficial que age ao longo da linha de contacto entre a partícula sólida e o filme de água. Este tipo de coesão designa-se por “coesão aparente” ou apenas “coesão” (Vargas, 1977).

No caso dos solos finos os espaços entre as partículas são reduzidos, pelo que os filmes de água serão pouco espessos e a pressão capilar será elevada. Como tal, tais solos serão coesivos.

2.1.3.2. Capacidade de Troca Iónica, Catiónica e Aniónica

Como referido, no sentido de equilibrar a eletronegatividade que predomina nas superfícies basais das partículas de argilas, estas tendem a atrair catiões que se encontram nos sais dissolvidos no meio aquoso e que se mantêm ligados por ligações débeis, podendo assim ser facilmente substituídos por outros. Estes catiões denominam-se por catiões de permuta ou de troca. Esta propriedade das argilas varia conforme a espécie do mineral, é inversamente proporcional ao tamanho da partícula e depende da concentração da solução aquosa (Vargas, 1977).

2.1.3.3. Granulometria

Considerando que num solo coesivo se distinguem duas frações de partículas consoante as suas dimensões. Uma das frações é caracterizada por partículas com dimensões superiores a $2\mu\text{m}$, consistindo na fração grosseira do solo, onde estão incluídos os seixos, as areias e as siltes. A outra fração é caracterizada por partículas com dimensões inferiores a $2\mu\text{m}$. Esta fração integra minerais argilosos e não argilosos, nomeadamente microgrãos de óxidos de ferro hidratados, sílica coloidal, cristais de quartzo (com diâmetro inferior a $2\mu\text{m}$) e matéria orgânica. (Vargas, 1977).

Os minerais argilosos predominam nesta fração e as suas propriedades influenciam o comportamento dos solos coesivos no que se refere à plasticidade, expansibilidade, coesão e resistência ao corte, entre outras. No entanto a presença de minerais não argilosos, atenua o efeito dos minerais argilosos no comportamento dos solos coesivos (Correia & Almeida da Benta, 2007; Vargas, 1977).

A figura 2.6 ilustra a classificação granulométrica das partículas existentes nos solos.



Figura 2.6 - Classificação dimensional das partículas existentes nos solos (Correia & Almeida da Benta, 2007)

2.1.3.4. Superfície Específica

Considerando as reduzidas dimensões das partículas de argila e a sua geometria lamelar, estas são caracterizadas por apresentarem enormes superfícies específicas (Cruz, 2009).

Define-se como superfície específica de um conjunto de partículas a razão entre a soma das suas superfícies exteriores e a soma dos seus volumes, ou das suas massas. Esta grandeza é inversamente proporcional às dimensões das partículas.

Esta propriedade favorece a interação entre partículas de argila e as moléculas de água presentes na solução aquosa, bem como com os sais que nela se encontram dissolvidos. Desenvolvem-se forças de natureza elétrica significativas que controlam o comportamento das partículas superando amplamente as forças do peso próprio.

De um modo geral, argilas com elevadas superfícies específicas apresentam elevada expansibilidade, elevados índices de plasticidade e quando saturadas apresentam resistência ao corte praticamente nula (Correia & Almeida da Benta, 2007).

2.1.3.5. Expansibilidade

Expansibilidade é a propriedade relacionada com as variações nos teores em água nos solos coesivos que resultam em variações volumétricas. Quando aumenta o teor em água do solo, isto é do conjunto de partículas, este expande. Em oposição quando diminui, o volume do solo diminui. De um modo geral, estas variações volumétricas dependem também de outras propriedades das argilas, inclusivamente a superfície específica, a capacidade de troca catiónica, a natureza dos iões de permuta, o grau de consolidação em que se encontra o solo, entre outros (Correia & Almeida da Benta, 2007).

Aplicando esta propriedade ao contexto da superfície específica, quanto maior esta for, maior é o volume de água adsorvido por unidade de massa de argila. Podendo a água aceder às superfícies internas, o acréscimo de volume é muito superior ao verificado para uma situação em que apenas as superfícies externas são envolvidas pela água. Na Figura 2.7 estão exemplificadas as duas situações descritas. Em “A” a água que acede ao mineral de argila é restringida às superfícies externas dos cristais e aos espaços vazios entre estes. A expansão que ocorre denomina-se por intercrystalina. Em “B” os catiões de troca e as moléculas de água ocupam os espaços entre as folhas. Quando a água penetra entre as camadas unitárias a expansão resultante designa-se por intracrystalina (Correia & Almeida da Benta, 2007).

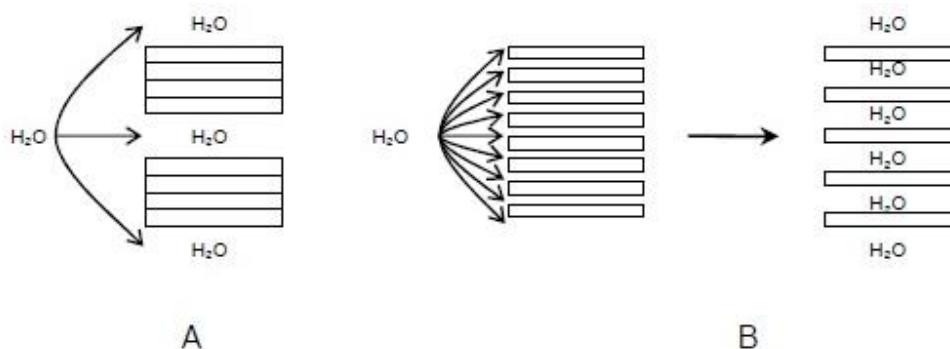


Figura 2.7 - (A) Expansão intercrystalina do mineral de argila, (B) Expansão intracrystalina do mineral de argila (Correia & Almeida da Benta, 2007)

A expansão intracrystalina ocorre quando as forças atrativas que interligam as camadas estruturais são inferiores às forças responsáveis pela retenção da água. As diferenças de comportamento observadas nos minerais argilosos expansivos resultam não da natureza das forças envolvidas mas sim de diferenças na sua magnitude. Uma superfície seca tem uma maior propensão a adsorver água, pelos motivos anteriormente referidos, em que os dipolos de água

são atraídos pela eletronegatividade da face da partícula de argila. Consequentemente, do aumento de volume e do aumento da distância entre partículas, resulta a redução das forças de natureza elétrica e dos fenômenos de interação entre partículas. As argilas saturadas também podem atrair água, desde que a carga que sobre elas atua seja reduzida. Um caso particular, o das argilas sobreconsolidadas, onde a entrada de água e o consequente aumento de volume ocorrem até ser atingido um novo índice de vazios de equilíbrio correspondente à nova carga instalada (Correia & Almeida da Benta, 2007).

2.1.3.6. Plasticidade

Um material plástico ideal, quando solicitado até à tensão de cedência, deforma-se continuamente sobre tensão constante e adquire deformações permanentes. As argilas, para certas gamas de teores de água, apresentam comportamento plástico, apesar de quando secas apresentarem plasticidade muito baixa ou nula. Esta propriedade dos solos coesivos é conferida pelos minerais de argila. Logo, quanto maior for o teor de minerais argilosos, maior será a sua plasticidade (Correia & Almeida da Benta, 2007).

Contudo outros fatores determinam a plasticidade das argilas: a natureza das trocas iônicas e a concentração iônica presente nas soluções aquosas intersticiais, a cristalinidade dos minerais argilosos e sua distribuição granulométrica bem como o teor em água. Por fim, a história geológica da argila, sobretudo o seu grau de diagénese (consolidação e cimentação) e a sua história tensorial são também fatores importantes.

A plasticidade tem sido avaliada por inúmeras técnicas. Em mecânica de solos, o intervalo de teores de água para o qual se observa comportamento plástico é numericamente traduzido pelo índice de plasticidade (IP). O Quadro 2.1 resume a classificação proposta por Jenkins (in Caputo, 1996)

Quadro 2.1 - Classificação das argilas relativamente ao Índice de plasticidade.

Argila	
Fracamente plástica	$1 < IP < 7$
Medianamente plástica	$7 < IP < 15$
Fortemente plástica	$IP > 15$

2.1.4. Estrutura dos solos coesivos

Em primeiro, importa referir que se as partículas de argila se encontrarem muito próximas umas relativamente às outras, as cargas positivas concentradas nos bordos de umas podem ser atraídas pelas cargas negativas das superfícies basais ou faces das outras (Das, 1941).

Considera-se o comportamento das argilas sob a forma de uma suspensão aquosa. Quando a argila se encontra inicialmente dispersa na água, as partículas adjacentes repelem-se em consequência do considerável espaço interpartículas. Neste caso as forças repulsivas superam as forças atrativas. O peso das partículas é negligenciável (Das, 1941). Assim, as partículas de

argila individuais assentam formando uma camada densa (Cristelo, 2001) ou permanecem em suspensão (Figura 2.8), experimentando movimentos Brownianos (movimentos ao acaso das partículas coloidais em suspensão) (Das, 1941). Este tipo de arranjo designa-se por estrutura dispersa ou aleatória e estas orientam-se sensivelmente em paralelo em relação umas às outras (Das, 1941).



Figura 2.8 - Estrutura Dispersa (Das, 1941)

Se as partículas de argila inicialmente dispersas na água se aproximam durante os movimentos ao acaso na suspensão, estas podem aglutinar-se em flocos visíveis com contacto face-bordo. Neste caso as partículas são mantidas juntas pela atração electrostática entre as cargas positivas dos bordos e as cargas negativas das faces. Esta aglutinação é conhecida por floculação. Quando as dimensões dos flocos aumentam, o efeito do seu peso deixa de ser desprezável. O arranjo das partículas constitui uma estrutura floculada e ilustra-se na Figura 2.9 (Das, 1941).

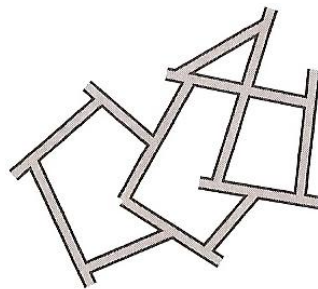


Figura 2.9 - Estrutura Floculada (Das, 1941)

Quando são adicionados sais à solução aquosa argila-água, que se encontrara inicialmente dispersa, os iões tendem a diminuir a dupla camada difusa em torno das partículas. Este efeito tende a reduzir as forças repulsivas interpartículas. As partículas de argila são assim atraídas umas pelas outras formando uma estrutura orientada (Das, 1941). A estrutura formada encontra-se na Figura 2.10.

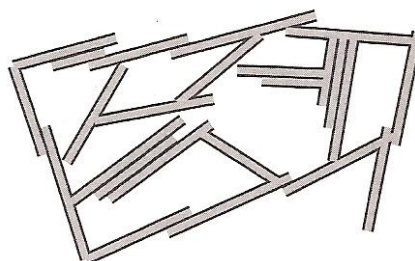


Figura 2.10 - Estrutura orientada (Das, 1941)

Segundo Das (1941) a orientação das partículas, neste tipo de estrutura, apresenta um considerável grau de paralelismo que se deve às forças Van der Waals.

Segundo Olphen (in Cristelo, 2001), numa estrutura floculada podem ocorrer vários tipos de arranjo estrutural entre partículas nomeadamente: face-com-face (FF), bordo-com-face (BF) e bordo-com-bordo (BB). A interação das forças elétricas difere em cada caso. Por exemplo, dos três casos referidos, apenas os tipos BB e BF conduzem a uma estrutura floculada. Estas são leves e possuem um elevado índice de vazios (Das, 1941). Do arranjo FF resultam partículas geralmente mais espessas que constituem uma estrutura orientada (Cristelo, 2001).

Ainda segundo Cristelo (2001), a estrutura aleatória (Mineiro, 1981), ou interação entre partículas minerais de argila isoladas, é rara, embora ocorra em argilas ativas e com um elevado índice de vazios, que não sofreram fortes tensões de compressão. A tendência será contudo para a formação de agregados de partículas, normalmente com uma orientação de tipo face-face.

Estudos com microscópio de digitalização de eletrões (scanning electron microscope) têm demonstrado que as partículas individuais de argila tendem a agregar-se ou a flocular em unidades submicroscópicas referidas como domínios (“domains”). Estes agrupam-se com o auxílio de forças interpartículas constituindo aglomerados (“clusters”). Estes, por sua vez, podem ser identificados apenas por um microscópio (light microscope) (Das, 1941).

Ao agrupar-se, os aglomerados dão origem a partículas (“peds”) que podem ser visualizados sem o auxílio de microscópio. Grupos de partículas têm um aspeto macroestrutural no qual se distinguem fissuras e juntas (Das, 1941). Todos estes arranjos estão ilustrados na Figura 2.11.

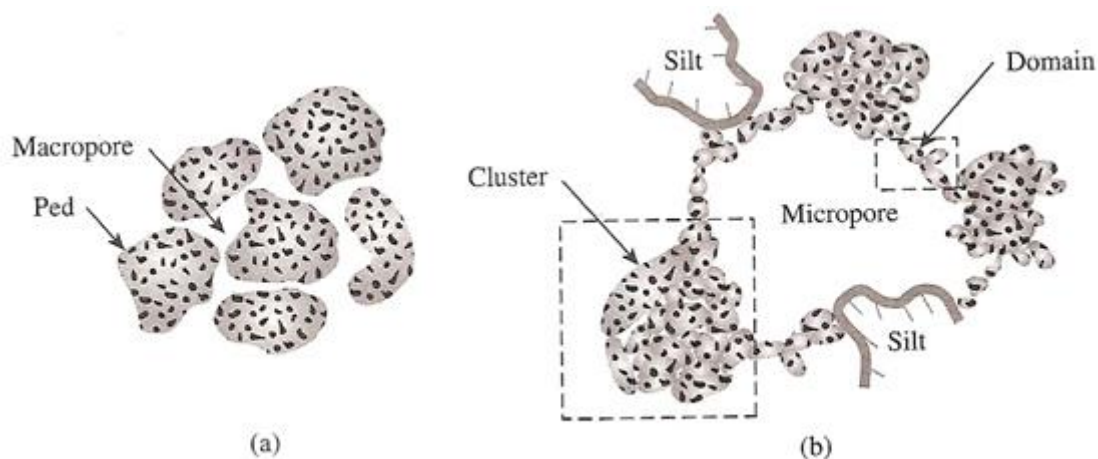


Figura 2.11 - Microestrutura argilosas: (a) arranjo de partículas e macroporos; (b) arranjo de domínios e aglomerados (Das, 1941)

Desta forma apura-se a complexidade da estrutura dos solos coesivos. Esta é influenciada pelo ambiente em que estão depositadas (Cristelo, 2001).

A estrutura dispersa, ou interação entre partículas minerais de argila isoladas, é rara, embora ocorra em argilas ativas e com um elevado índice de vazios, que não sofreram fortes tensões de compressão. A tendência será contudo para a formação de agregados de partículas, normalmente com uma orientação de tipo FF (Das, 1941).

2.2. Compactação

2.2.1. Confronto de conceitos

Compactação e consolidação são ambos processos de estabilização e melhoria das propriedades dos solos. Resultam no aumento da resistência e redução da deformabilidade da estrutura de solo.

A compactação de um solo é conseguida através de uma ação mecânica de rápidas e repetidas cargas introduzidas sob o solo que determina a formação de um novo arranjo das partículas da fase sólida com a expulsão do ar nos interstícios entre as partículas. Ou seja, o índice de vazios é consequentemente reduzido, refletindo-se este processo, na redução do volume da sua fase gasosa. A fase líquida do solo, o seu teor em água, permanece inalterado (Melo & Ferreira, 1981).

Por sua vez, a consolidação traduz-se num processo relativamente lento provocado pela ação de uma carga estática que conduz à progressiva aproximação das partículas sólidas com o consequente escoamento da fase líquida (Melo & Ferreira, 1981).

2.2.2. Influência do teor em água na compactação

Para um dado solo e para um dado valor de energia de compactação aplicada por uma unidade de volume de um solo coesivo, a quantidade de material sólido que é possível incluir, por compactação, dentro da unidade de volume do solo compactado, designa-se por peso específico aparente seco, γ_d (Melo & Ferreira, 1981 e Fernandes, 2005). Esta propriedade varia em função do teor em água do próprio solo, cuja representação gráfica corresponde a uma parábola tal como a curva ilustrada na Figura 2.12.

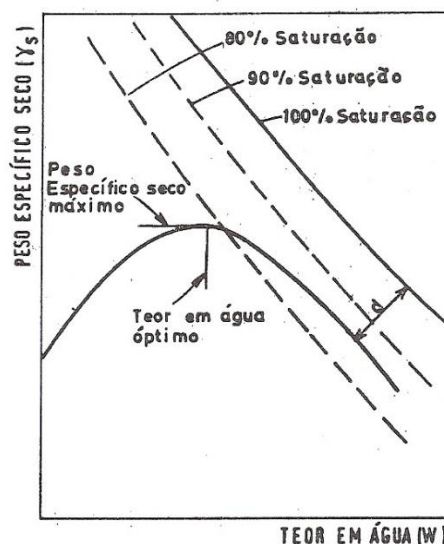


Figura 2.12 - Curva de compactação de um solo coesivo (Melo & Ferreira, 1981)

Esta curva designa-se por curva de compactação e a sua configuração depende ainda da energia e do tipo de compactação adotado, assim como da granulometria do próprio solo.

O ramo da curva relativo aos valores do teor em água à esquerda do máximo da curva designa-se por ramo seco, enquanto o ramo relativo aos valores do teor em água à direita do máximo da curva designa-se por ramo húmido. Com o aumento do teor em água, este último tende a desenvolver-se paralelamente à curva correspondente a 100% de saturação, curva que relaciona o teor em água caso todo o ar tenha sido expulso (Melo & Ferreira, 1981).

A distância “d” entre esse ramo da curva e a curva de 100% de saturação constitui assim um indicador da quantidade de ar contida no solo compactado (Melo & Ferreira, 1981).

Da Figura 2.12, deduz-se que para um dado nível de energia por unidade de volume, existe um determinado valor de teor em água ao qual corresponde o máximo valor do peso específico seco, “ $\gamma_{d \text{ máx}}$ ”. O referido valor de teor em água designa-se por teor em água óptimo, “ w_{opt} ” (Melo & Ferreira, 1981).

2.2.3. Influência da energia de compactação

Da análise da Figura 2.13, facilmente se conclui que os resultados do processo de compactação dependem da energia comunicada à unidade de volume do solo. À medida que os níveis de energia aumentam, aumentam os pesos específicos secos correspondentes a um qualquer valor de teor em água. Neste processo, verifica-se uma diminuição dos teores em água ótimos (Melo & Ferreira, 1981).

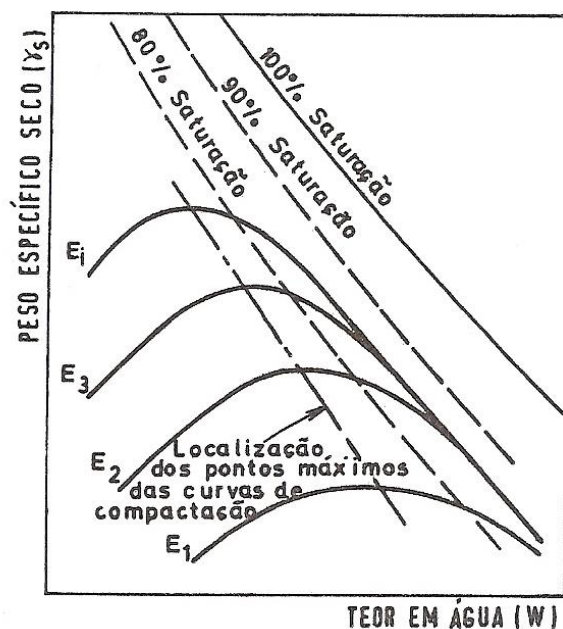


Figura 2.13 - Família de curvas de compactação relativas a um mesmo solo e a um mesmo método de compactação para diferentes níveis de energia (Melo & Ferreira, 1981)

A Figura 2.13 evidencia a situação de compactação mencionada para diversos níveis de energia, tais que $E_1 < E_2 < E_3 < \dots < E_i$. Depreende-se que a linha, ilustrada nesta figura, que une os máximos das várias curvas progride paralelamente à curva correspondente a 100% de saturação.

Ainda, verifica-se que, para as diferentes curvas, os ramos húmidos tendem a convergir para a curva de saturação, sobrepondo-se umas às outras, sem nunca a atingirem. Tal indica que para um dado tipo de compactação há um limite de grau de saturação e, por maior que seja a energia fornecida, não é possível ultrapassá-lo (Melo & Ferreira, 1981).

Conclui-se então que, para um dado solo coesivo e para uma dada energia de compactação, existe um valor máximo de compacidade que só é possível atingir caso a compactação seja realizada com um teor em água próximo do ótimo, o qual é função do nível de energia transmitido, diminuindo à medida que esta aumenta (Melo & Ferreira, 1981).

2.2.4. Influência da granulometria na compactação

Importa salientar que o estudo da influência da granulometria depende, como referido anteriormente, do teor em água com que o solo é compactado. Assim, as mesmas condições iniciais e a mesma energia têm de ser empregues (Fernandes, 2006).

Nos solos com maior fração fina, mais plásticos, o teor em água é maior e proporciona valores de peso específico seco inferiores. Constata-se que o teor em água ótimo aumenta com o caráter plástico do solo (Fernandes, 2006).

Os solos com maior percentagem de partículas grosseiras expressam curvas cujo teor em água ótimo corresponde a valores mais elevados de peso específico seco, comparativamente aos solos descritos anteriormente (Moreira, 2008).

Este efeito pode ser facilmente visualizado analisando as diferentes curvas de compactação ilustradas na Figura 2.14. Uma curva de um solo mais plástico revela-se mais aberta em oposição a uma curva de um solo menos plástico que se manifesta mais fechada. Quanto maior o índice de plasticidade, ou quanto menos bem graduado for o solo, mais aberta se torna a curva.

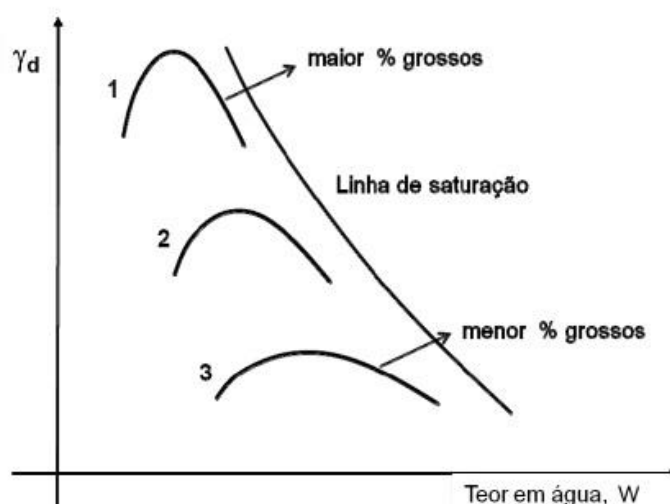


Figura 2.14 - Curvas de compactação de solo com diferentes percentagens de partículas grossas (Moreira, 2008)

2.2.5. Comportamento dos solos coesivos face à compactação

É expectável que o comportamento de um solo seja explicado a partir da curva de compactação para as condições em que foi realizada. No entanto, uma explicação teórica desse mesmo comportamento revela-se uma tarefa difícil uma vez que implica uma sobreposição de efeitos relacionados com a distribuição de tensões pelas fases líquida, gasosa e sólida, pelos fenómenos de capilaridade resistência ao corte, permeabilidade, deformabilidade, entre outras (Melo & Ferreira, 1981).

Segundo Proctor (in Melo e Ferreira, 1981), num material argiloso dotado de teor em água inferior ao ótimo, a existência de forças de origem em fenómenos de capilaridade determina o aparecimento de forças interpartículas. Estas, por sua vez, reduzem os efeitos que se pretende obter com a compactação. As forças de natureza capilar surgem quando se ultrapassa um determinado intervalo de valores de teor em água, caracterizado por valores muito baixos. Para a gama de valores de teores em água nesse intervalo, as partículas do solo exibem um comportamento diferente do esperado para a compactação revelando pouca sensibilidade à pequena variação de teor de água.

Na Figura 2.15, encontra-se expresso o comportamento típico de um solo argiloso.

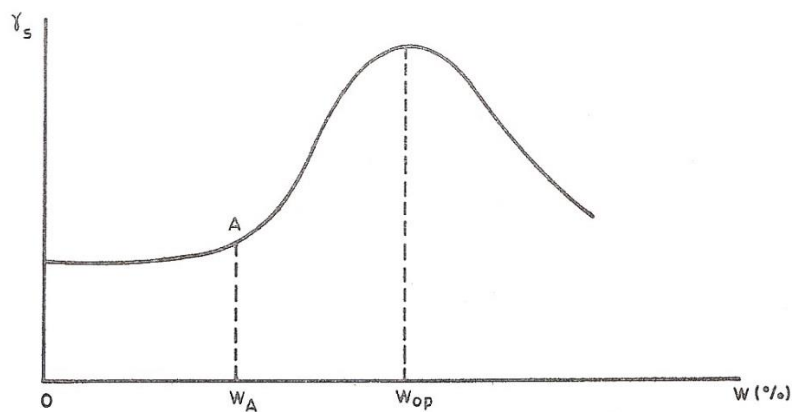


Figura 2.15 - Curva de compactação de um solo argiloso abrangendo a zona de teores em água próximos de zero (Melo & Ferreira, 1981)

Em campo ou em laboratório, trabalha-se com uma gama de valores relativos aos pontos da curva à direita do ponto “A”, ou seja para teores em água superiores a este limite ($w > w_A$). Os valores à esquerda do ponto “A” são normalmente omissos.

No ramo seco da curva, à medida que progride o teor em água as forças de capilaridade começam a diminuir, assim como as forças interpartículas. Daqui advêm duas consequências que afetam a evolução do peso específico seco do solo compactado (Melo & Ferreira, 1981):

- em primeiro, surge uma maior facilidade em promover a alteração da posição relativa das várias partículas que constituem o solo o que se reflete na formação de novos arranjos estruturais efetivamente mais compactos;
- em segundo, a redução de forças de capilaridade reverte para a diminuição das forças interpartículas que conduz ao afastamento médio entre estas e à diminuição do peso específico seco.

Para valores de teor em água relativamente baixos, próximos de W_A , o solo detém elevada quantidade de ar. Como tal, ligeiros acréscimos de água revelam-se significativos na expulsão de apreciáveis quantidades de ar e na simultânea constituição de novos arrumos entre partículas. Aumentando o teor em água o volume de ar vai diminuindo até ao ponto em que o processo de compactação utilizado já não permite melhorar mais as propriedades do solo. Isto é, já não faculta a expulsão de ar resultando daí o decréscimo do peso específico seco. A diminuição de forças de capilaridade características do aumento do teor em água no solo que origina o afastamento das partículas começa a ser tomado como fundamental, à medida que o défice de água no solo se vai atenuando e começa a haver água no estado livre nos vazios do material (Melo & Ferreira, 1981).

Em resumo o peso específico seco evolui no sentido crescente para baixos valores do teor em água e evolui no sentido decrescente para valores elevados do mesmo. A transição entre ambos os estados é claramente definida pelo máximo da curva referente, em ordenadas, ao teor em água ótimo (Melo & Ferreira, 1981).

2.2.6. Compactação no ramo seco ou no ramo húmido

Sobre curvas de compactação de um solo para um dado nível de energia, resta referir que a sua configuração parabólica sugere que a um determinado valor do peso específico seco em ordenadas, correspondem diferentes valores de teor em água em abcissas.

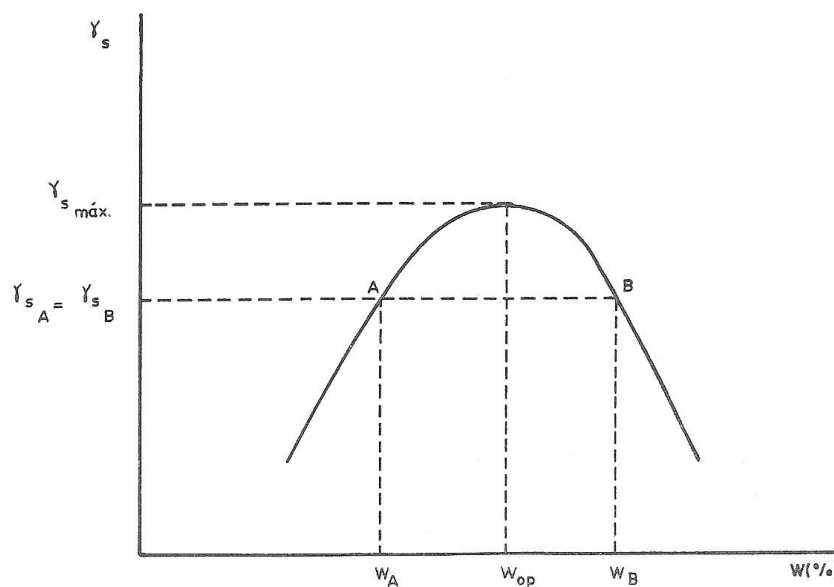


Figura 2.16 - Curva de Compactação de um solo argiloso (Melo & Ferreira, 1981)

Na Figura 2.16 os pontos A e B da curva ostentam o mesmo valor de peso específico seco ($\gamma_{sA} = \gamma_{sB}$). No entanto estes valores são relativos a diferentes valores de teor em água (W_A e W_B) em que um situa-se no ramo seco (W_A) e o outro situa-se no ramo húmido da curva (W_B). Este aspeto não é sinónimo de que com diferentes teores em água se consegue obter o mesmo peso específico seco com o mesmo comportamento do solo. Muito pelo contrário. Importa referir

que a compactação no ramo seco ou no ramo húmido da curva traduz-se em diferentes características no que remete à resistência ao corte, à deformabilidade e à permeabilidade (Melo & Ferreira, 1981).

2.2.6.1. Do ponto de vista da Resistência ao Corte e Deformabilidade

Quando a compactação é realizada no ramo seco grande parte dos vazios são ocupados por ar exceto uma percentagem mínima dos vazios junto às partículas sólidas que é preenchido por água. (Melo & Ferreira, 1981)

Do reduzido teor em água e da significativa fase gasosa que o solo compactado apresenta, derivam fenómenos de capilaridade na interface ar-água que equivalem a forças de sucção. Estas aproximam as partículas sólidas de tal forma que passam a integrar o conjunto das forças atrativas. Deste modo aumentam as tensões efetivas instaladas e a resistência ao corte e os solos resultam também menos deformáveis. (Melo & Ferreira, 1981).

Se a compactação for realizada no ramo húmido, o acréscimo de teor em água no solo diminui as forças de capilaridade assim como as forças de ligação interpartículas atuantes. A resistência ao corte espera-se inferior ao verificado para o ramo seco, contudo poderá ainda diminuir em consequência do aumento da deformabilidade decorrente do aumento do teor em água. Assim, mesmo cargas de intensidade reduzida podem ser suscetíveis de provocar deformações no solo. Estas deformações podem anular vestígios de quaisquer forças capilares e originar tensões neutras positivas que atenuando as tensões efetivas instaladas vão reduzir a resistência ao corte (Melo & Ferreira, 1981).

2.2.6.2. Do ponto de vista da Permeabilidade

Os elevados índices de vazios de um solo compactado no ramo seco, comunicando entre si, torna-os mais permeáveis que os solos compactados no ramo húmido. Para teores em água próximos do ótimo a comunicação entre o ar contido nos vazios cessa (Melo & Ferreira, 1981). No ramo húmido, apesar do aumento da distância média interpartículas, com o aumento do teor em água da compactação, para o qual se esperaria que a permeabilidade aumentasse, mas a natureza dos arranjos estruturais que ocorrem nesse ramo da curva levam a que a permeabilidade continue a diminuir. Logo, quanto maior o teor em água, maior a permeabilidade (Melo & Ferreira, 1981).

2.2.6.3. Repercussões da compactação no ramo seco ou húmido

As repercussões esperadas podem advir do afastamento do teor em água relativamente ao ótimo, dependendo da natureza do solo em questão, em particular da sua constituição mineralógica. É a sensibilidade à água dos minerais argilosos constituintes do solo que determina quantitativamente a relevância dos fenómenos descritos. O acréscimo de água em solos compactados no ramo seco pode apresentar poucas repercussões no que toca à resistência ao corte ou à deformabilidade. No entanto, pode estar na origem de colapsos estruturais dos quais

ocorrem deformações e aumentos de tensões neutras muito superiores aos que se obteriam caso a compactação fosse realizada no ramo húmido (Melo & Ferreira, 1981).

3. ENSAIOS LABORATORIAIS PRELIMINARES

3.1. Materiais

Todos os solos utilizados nos ensaios realizados foram recolhidos em campo no estado natural. Antes de serem recolhidas amostras em maiores quantidades, foram testadas pequenas porções em laboratório através do ensaio para determinação dos limites de plasticidade, segundo a NP-143 (1969) por forma a verificar se as mesmas eram dotadas das características adequadas para realizar os ensaios de compactação, isto é, serem os solos plásticos. Posteriormente, após identificados e recolhidos cinco solos plásticos, estes foram tratados em laboratório segundo o preconizado pela E195 – 1966 para preparar amostras de solo passíveis de serem utilizadas nos diversos ensaios programados.

A cada solo foi atribuída uma determinada designação atendendo às características das zonas em que foi recolhido, cujas coordenadas de localização GPS se resumem no Quadro 3.1 e se ilustram da Figura 3.1 à Figura 3.5:

- o solo “Hospital Pediátrico” foi recolhido em Coimbra, num talude situado nas proximidades do Hospital Pediátrico;
- o solo “Solo B” provém da Póvoa do Valado, em Aveiro, nas imediações do IC1;
- o solo “Zona Industrial” foi retirado de um talude localizado na zona industrial de Ponte de Sor;
- o solo “Ribeirinha”, à semelhança do anterior foi retirado de um talude nas imediações da ribeira do Sor, efluente ao Rio Sor;
- por fim, o solo “Ladeiras”, foi removido de ladeiras nas imediações de uma pista de motocross, em Ponte de Sor.

Quadro 3.1 - Localização dos solos utilizados

Designação	Localização	Latitude	Longitude
Hospital Pediátrico	Coimbra	40°13'23.02"N	8°24'59.78"W
Solo B	Aveiro	40°34'23.81"N	8°36'17.81"W
Ladeiras	Ponte de Sor	39°14'30.32"N	7°59'50.62"W
Zona Industrial	Ponte de Sor	39°15'57.14"N	8° 0'57.43"W
Ribeirinha	Ponte de Sor	39°14'9.23"N	8° 0'49.31"W



Figura 3.1 - Marcador do local do solo “Hospital Pediátrico” através Google Earth.



Figura 3.2 - Marcador do local do “Solo B” através Google Earth.



Figura 3.3 - Marcador do local do solo “Ladeiras” através Google Earth.



Figura 3.4 - Marcador do local do solo “Zona Industrial” através Google Earth.



Figura 3.5 - Marcador do local do solo “Ribeirinha” através Google Earth.

3.2. Ensaio de Identificação de Solos

Antes de proceder aos ensaios de caracterização das propriedades de compactação destes solos, procede-se à realização de ensaios de identificação dos solos. Estes compreendem os ensaios de análise granulométrica segundo a E196 - 1966 (que integra peneiração grossa (partículas superiores a 2 mm), peneiração fina (partículas entre os 2 mm e os 0,075 mm) e sedimentação para as partículas inferiores a 0,075 mm), a determinação da densidade de partículas pela NP – 83 (1965) e a determinação do teor em água pela NP – 143 (1969). As curvas granulométricas dos vários solos estão ilustradas na Figura 3.6.

A classificação dos solos é feita segundo a E 240 – 1970 (Classificação de Solos para Fins Rodoviários) e a Classificação Unificada de solos da ASTM D-2487 – 85.

Os resultados obtidos dos ensaios realizados são apresentados do Quadro 3.2 ao Quadro 3.6.

3.2.1. Densidade das partículas

Quadro 3.2 - Densidade das partículas

Designação	Densidade das partículas
Hospital Pediátrico	2,50
Solo B	2,71
Ladeiras	2,66
Zona Industrial	2,65
Ribeirinha	2,65

3.2.2. Análise granulométrica (E 196 – 1966)

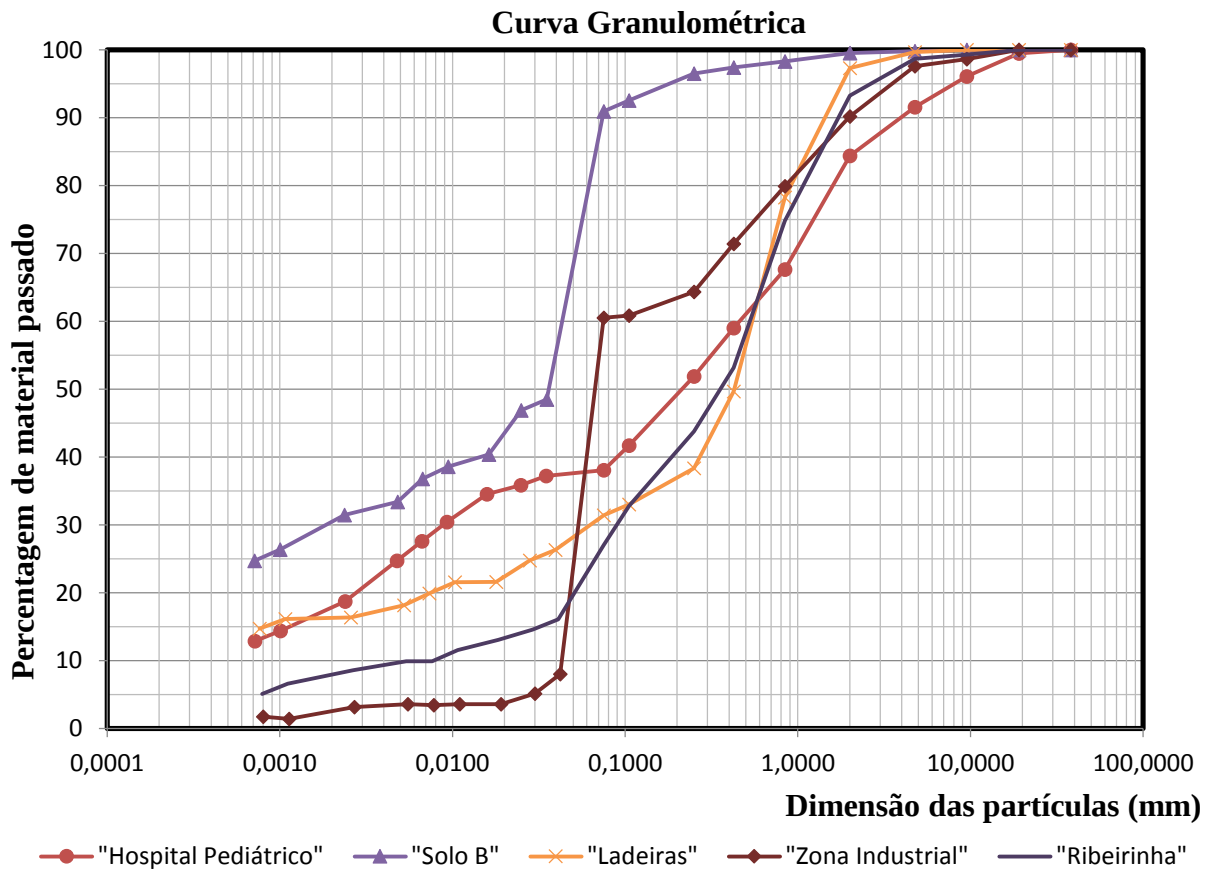


Figura 3.6 - Curvas granulométricas de todos os solos.

Quadro 3.3 - Interpretação da Análise granulométrica.

	Percentagem de Retidos Peneiro n.º 4	Percentagem de Retidos Peneiro n.º 10 (s/ anteriores)	Percentagem de Retidos Peneiro n.º 10	Percentagem de Passados Peneiro n.º 200	Interpretação da Curva granulométrica no cap. 3.2.2.
H. Pediátrico	8	8	54	38	Extensa
Solo B	0	0	9	91	Mal graduada
Ladeiras	0	3	66	31	Extensa
Z. Industrial	2	8	31	61	Mal graduada
Ribeirinha	1	6	67	27	Extensa
	Material rejeitado	Material utilizado			

3.2.3. Limites de Consistência

Quadro 3.4 - Limites de Consistência ao abrigo da NP 143 – 1969

Designação	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade
Hospital Pediátrico	22	15	7
Solo B	35	20	15
Ladeiras	35	21	14
Zona Industrial	22	17	9
Ribeirinha	26	17	5

3.2.4. Classificação de Solos para fins rodoviários

Quadro 3.5 - Classificação de Solos para fins rodoviários segundo E 240 - 1970

Designação	Índice de Grupo	Grupo ou subgrupo	Constituintes significativos dos solos
Hospital Pediátrico	1	A-4	Solos siltosos
Solo B	10	A-6	Solos argilosos
Ladeiras	1	A-2-6	Seixo e areia siltosos ou argilosos
Zona Industrial	5	A-4	Solos siltosos
Ribeirinha	0	A-2-4	Seixo e areia siltosos ou argilosos

3.2.5. Classificação Unificada

Quadro 3.6 - Classificação Unificada segundo ASTM 2487 - 85

Designação	Símbolo do grupo	Nome do grupo
Hospital Pediátrico	SC-SM	Areia siltosa ou areia argilosa
Solo B	CL	Argila magra
Ladeiras	SC	Areia argilosa
Zona Industrial	SC	Areia argilosa
Ribeirinha	OL	Argila orgânica arenosa

3.3. Equipamentos utilizados

O procedimento de compactação em laboratório comumente utilizado decorre dos designados ensaios de compactação de Proctor, introduzidos em 1933 por Ralph Proctor.

Ralph Roscoe Proctor, membro da ASCE, American Society of Civil Engineers, desenvolveu durante a construção da barragem de Bouquet Canyon (1932-1934) um procedimento que

permitia determinar o teor em água ótimo do solo compactado utilizado para a construção da mesma, fixando a energia de compactação, e as dimensões da amostra de solo. Para esse teor em água ótimo alcança-se o peso específico seco máximo.

Este procedimento começou por ser designado por Standard Proctor Test, ou ensaio de Proctor recorrente, e era enunciado na norma americana ASTM (American Society for Testing and Materials Test Designation), D-698 e AASHTO (American Association of State Highway Officials Test Designation) T-99. Contudo, com o desenvolvimento de cilindros pesados para proceder à compactação em campo, este foi alterado para melhor reproduzir as condições em campo. A nova versão da norma era referida por Modified Proctor Test, ou ensaio de Proctor modificado e era descrita pela norma americana ASTM D-1557 e AASHTO T-180 (Das, 1941). A especificação do LNEC para os ensaios de compactação E 197 – 1966 baseia-se nas normas anteriormente citadas, sendo aí referido que o ensaio de compactação permite fixar um termo de comparação para o controle do peso específico e da humidade no campo. Esta integra ambas as versões, destacando dois tipos de compactação, leve e pesada, consoante a massa do pilão do compactador: 2,49 kg para compactação leve e 4,54 kg para compactação pesada. A compactação leve equivale ao ensaio de Proctor recorrente e a compactação pesada ao ensaio de Proctor modificado.

Para estes dois níveis de energia, pode fazer-se variar a compactação, usando um molde de aço pequeno de 102 mm de diâmetro interior e 117 mm de altura, ou mesmo usando um molde grande com 152 mm de diâmetro interior e 178 mm de altura. A escolha do tipo de molde baseia-se na granulometria do solo.

Qualquer que seja a combinação de energia e tamanho do molde o procedimento é em tudo semelhante à exceção de dois aspetos: i) o número de camadas de solo a compactar, isto é, o número de frações em que se divide uma porção de solo com aproximadamente 2 kg; ii) o número de impactos do pilão. O quadro 3.7 resume as variantes e as diferenças entre o tipo de ensaio.

Quadro 3.7 - Modalidades dos ensaios de compactação segundo LNEC, E 197 – 1966

	Compactação Leve		Compactação Pesada	
	Molde pequeno	Molde grande	Molde pequeno	Molde grande
N.º de camadas	3	3	5	5
N.º de pressões	25	55	25	55
Massa do pilão	2,49 kg	2,49 kg	4,54 kg	4,54 kg

O compactador pode ser manual ou automático. Para este último é possível quantificar a energia específica de compactação, que pode ser definida pela expressão:

$$E = \frac{W_p \times h \times n \times c}{V}$$

O teor em água ótimo e o peso específico seco do solo são determinados através de uma curva de compactação como referido previamente no Capítulo 2. Destaca-se que é fundamental que as várias amostras necessárias para constituir as várias curvas de compactação provenham todas

de uma massa de solo remexido em semelhantes circunstâncias. Ou seja, as condições iniciais devem ser as mesmas. Complementarmente, as amostras não devem provir de uma amostra compactada e seguidamente destorroadada para reutilização (Fernandes, 2006).

Segundo Massad (in Fernandes, 2006) a reutilização não é recomendável. Da compactação pode resultar a quebra de partículas o que se reflete na alteração da granulometria da amostra caso seja reutilizada. Ainda o ciclo secagem-humedecimento pode ter repercussões nas características de alguns solos não só pela aglutinação de partículas como pelas transformações irreversíveis que podem ocorrer em determinados minerais argilosos.

Além do equipamento mencionado, existem outros equipamentos que permitem compactar amostras de solo em laboratório, como é o caso do compactador Miniatura de Harvard. Uma vez que é sobre este equipamento que incide grande parte do estudo da presente dissertação, dedica-se o próximo capítulo exclusivamente a esse tema. Os ensaios de Proctor serão úteis na medida em que são normalizados e permitem estabelecer um ponto de comparação no estudo do compactador Miniatura de Harvard.

4. COMPACTADOR MINIATURA DE HARVARD

4.1. Equipamento

Ao longo do tempo o equipamento projetado por Wilson sofreu várias alterações. Atualmente, o equipamento é composto pelos seguintes elementos:

- Molde cilíndrico de metal com 33,34 mm de diâmetro interno ($1\frac{5}{16}$ polegadas) e 71,5 mm de altura (2,816 polegadas). Tem capacidade para conter $62,4\text{ cm}^3$ de volume de solo. Associados ao molde estão outros acessórios ilustrados na Figura 4.1.

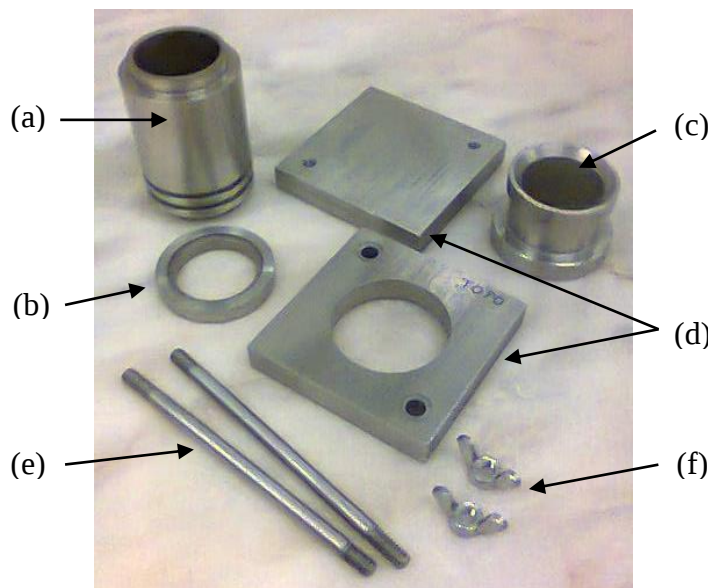


Figura 4.1 - Elementos que constituem o molde: (a) Molde; (b) Anel da base; (c) Alonga; (d) Peças de topo e base, roscadas nas extremidades. Elementos que integram o suporte do molde: (e) varas de ligação entre as peças de topo e base; (f) Porcas para apertar o conjunto.

Acresce aos acessórios anteriores:

- um martelo manual cilíndrico encerrando no seu interior uma mola em compressão. O martelo é dotado de sulcos ao longo do seu perímetro que, ao proporcionar atrito, impedem as mãos do operador de deslizar sobre o metal. O mercado disponibiliza atualmente molas de 20 lb (9,07 kg), 37,5 (17,01 kg) e 40 lb (18,14 kg). Na versão original o equipamento apenas dispunha da mola de 40 lb (Humboldt, 2003). Associados ao martelo estão outros acessórios, ilustrados nas Figuras 4.2 e 4.3. O pormenor do martelo compactador montado é exibido na secção 4.1.2;



Figura 4.2 - Acessórios que integram o martelo.



Figura 4.3 - Molas existentes com respetivo espaçador. Mola de 20 lb a amarelo, mola de 37,5 lb a cinzento e mola de 40 lb a vermelho.

- aparelho que permite remover a alonga e desmoldar. A primeira versão proposta por Wilson incluía dois aparelhos desempenhando cada um as funções de remover a alonga e de retirar a amostra de dentro do molde, respetivamente. O aparelho atual, ilustrado nas Figuras 4.4 e 4.5 integra ambas as funções.

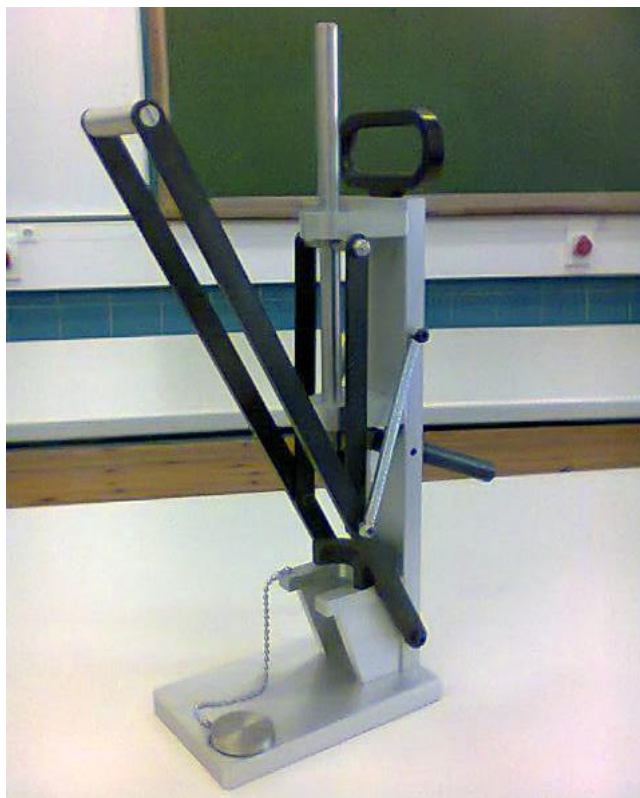


Figura 4.4 - Aparelho para remover a alonga e desmoldar a amostras.

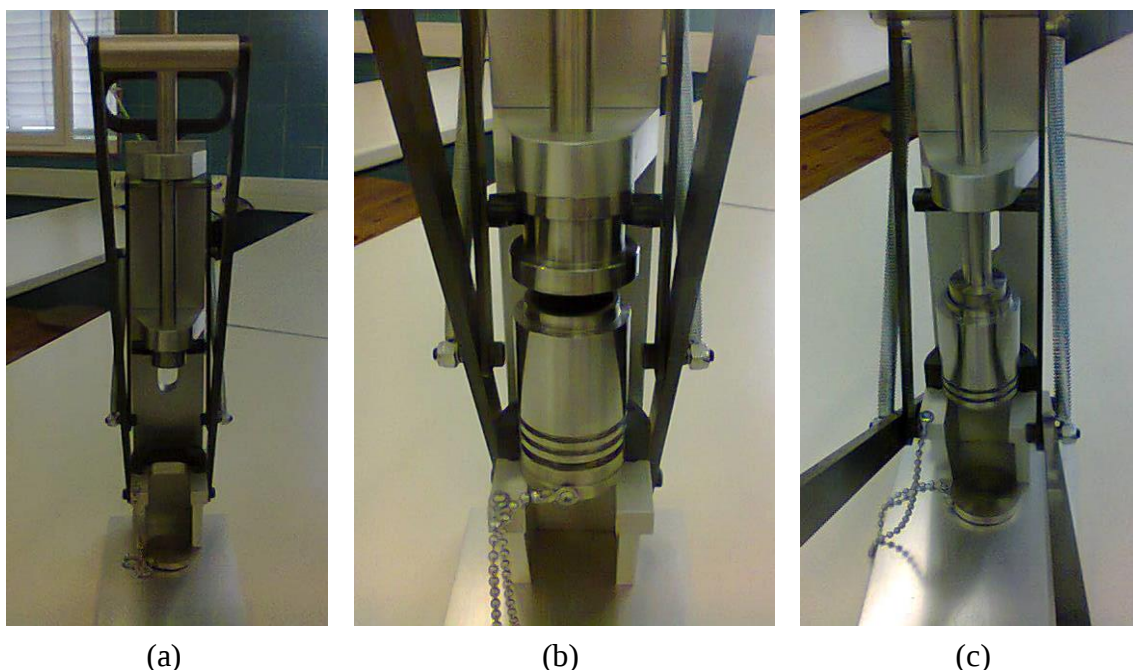


Figura 4.5 - (a) Aparelho de frente; (b) Pormenor de como se retira a alonga; (c) Pormenor de como o aparelho desmolda a amostra.

Atendendo às dimensões interiores do molde e ao rácio entre a altura e o diâmetro do molde, isto é, 2,14, as amostras resultantes da compactação com este equipamento podem ser utilizadas

em equipamentos de ensaios triaxiais. Em 1963, a Universidade de Harvard atualizou as dimensões das amostras, passando a ter 35,56 mm de diâmetro e 88,9 mm de altura. O Laboratório de Geotecnia e Fundações do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra apenas possui o molde e respectivos acessórios referentes à primeira configuração apresentada.

Apesar do ensaio de compactação de Harvard ser usado ocasionalmente para determinar características de compactação de solos coesivos quando apenas estão disponíveis pequenas quantidades, este não substitui o ensaio de Proctor para efeitos de controlo de compactação. Contudo, continua a ser usado para preparar amostras de solos coesivos para ensaios triaxiais. O procedimento de compactação de Harvard é apresentado na ASTM STP 459 (Wilson, 1970).

4.1.1. Montagem do equipamento

4.1.1.1. Montagem do molde

A montagem do molde compreende a seguinte sequência:

1) As varas de ligação devem ser enroscadas à peça da base do suporte. O anel da base deve ser disposto no centro da base do suporte e acima deste deve ser encaixado o molde (Figura 4.6). A alonga segue-se ao molde, em cima do qual deve ser inserida. Por fim dispõe-se a peça de topo do suporte por cima, com as varas e a alonga ajustadas nos espaços correspondentes e apertam-se as roscas completando todo o conjunto (Figura 4.7).

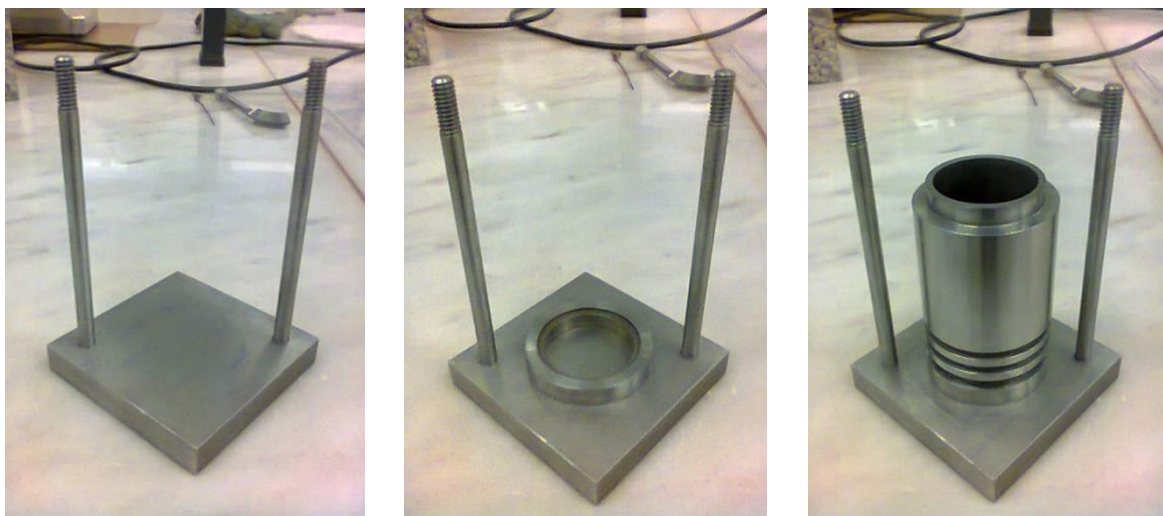


Figura 4.6 - Sequência de montagem da esquerda para a direita

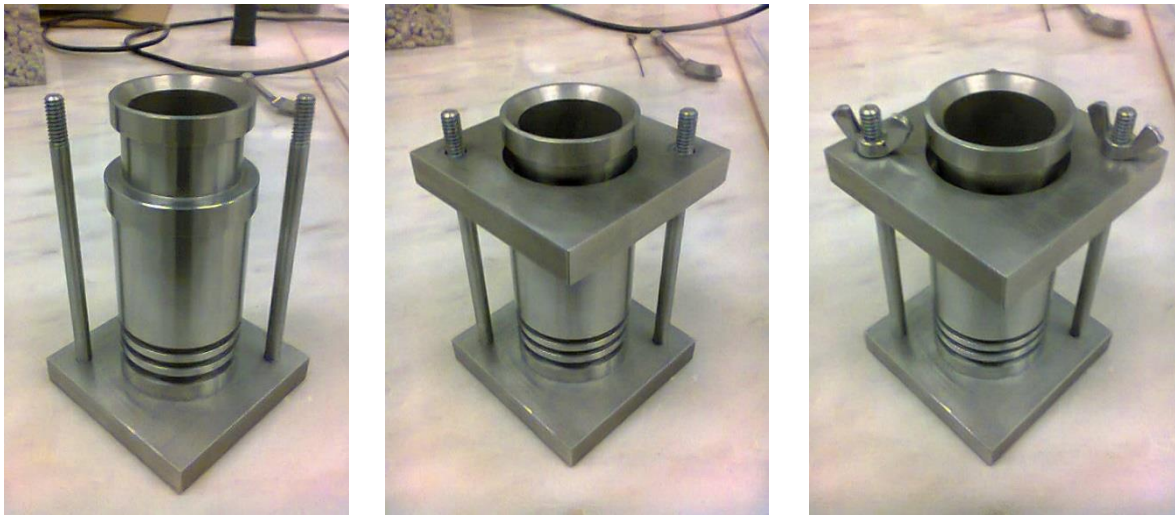


Figura 4.7 - Sequência de montagem da esquerda para a direita

4.1.1.2. Montagem do martelo

O martelo é constituído por um eixo central do lado de uma pequena peça cilíndrica disposta na perpendicular. É no eixo que se coloca a mola com que se pretende compactar, antecedida por uma fina chapa metálica que fica intercalada entre a mola e a peça cilíndrica perpendicular. Abaixo desta peça, e encaixada no eixo, coloca-se uma chapa mais grossa com dois furos roscados no interior.

O cilindro coloca-se também no eixo, contendo todos os acessórios no seu interior. Os furos da chapa metálica devem ficar alinhados com os do cilindro onde, posteriormente, se devem instalar os parafusos. Todavia, antes de os colocar, comprime-se a mola e enrosca-se a rosca para sustentar a mola. Se preferível pode ser colocado nesta fase o espaçador. Caso contrário a rosca deve ser desapertada após a colocação dos parafusos, sem perigo de se desmontar os acessórios referidos, aliviando a mola, deve ser colocado o espaçador e as duas roscas novamente. A Figura 4.8 ilustra toda a sequência de montagem.



Figura 4.8 - Sequência de montagem da esquerda para a direita.

Os parafusos apertados no cilindro permitem que a mola fique contida no interior do cilindro, sem que este seja projetado, isto porque a mola se encontra sob pressão.

4.2. Procedimento

4.2.1. Procedimento original proposto por Wilson

Inicialmente o procedimento proposto por Wilson (1970) era válido para o equipamento original. Posteriormente este procedimento fora reformulado pela Humboldt, uma das empresas que comercializa o equipamento existente na actualidade, sendo este apresentado seguidamente.

Sobre o modo de preparação das amostras, recomenda-se que o solo se seque ao ar, simulando condições de pouca humidade, uma amostra de 2 a 3 lb (910 a 1360 g) de material passado no peneiro nº.4 (4,75 mm de abertura das malhas). Para desagregar os grumos e garantir a homogeneidade a mistura deve ser bem revolvida. Seguidamente, deve ser dividida em seis a oito porções, de tal forma que cada porção contenha um pouco mais que a quantidade de material suficiente para em ensaio. A cada porção deve ser adicionada aproximadamente a quantidade de água necessária para obter o intervalo desejado de teores em água. Cada porção deve ser introduzida num pequeno recipiente o qual deve ser selado e guardado de um dia para o outro, até que esteja pronto para os ensaios. Destaca-se que, para solos que formam facilmente uma mistura homogénea com água, basta apenas adicionar água e misturar imediatamente antes do ensaio. Importa que a amostra seja compactada e que não seja reutilizada

Após preparadas as amostra e instalados no suporte o molde e a alonga, o solo desagregado pode ser introduzido no molde. Para cada uma das cinco camadas, coloca-se duas ou três colheres de chá ligeiramente cheia. A superfície deve ser nivelada pressionando levemente com um êmbolo de madeira.

O martelo deve ser inserido no molde até que esteja em contacto com a superfície de solo. Pressiona-se o cilindro para baixo, até que a mola comece a comprimir. Devem ser aplicadas quatro pressões em quadrantes separados e adjacentes ao molde. A quinta pressão deve ser aplicada no centro, fazendo uma cobertura completa na superfície do solo. Este ciclo deve ser repetido a uma taxa de 10 pressões em 15 segundos. Cada pressão é finalizada libertando a força imprimida no martelo e posicionando-o numa nova posição.

O procedimento descrito deve ser repetido para cada camada adicionada até ser alcançado o número de camadas compactadas requeridas. A camada de topo deve ultrapassar pelo menos 12,7 mm (0,5 polegadas) acima da alonga.

Após retirar o molde do suporte, o disco espaçador deve ser inserido no aparelho destinado à remoção da alonga. O molde deve ser colocado sobre o disco, encaixando-o devidamente no aparelho através das saliências correspondentes. Premindo a alavanca para baixo, a alonga é separada do molde e do solo compactado. Posteriormente, remove-se o anel da base e procede-se ao alisamento dos topos da amostra.

Prossegue-se com a pesagem do molde contendo o solo compactado, aproximado esse valor à décima de grama. É conveniente tarar a balança com o molde vazio em cima da mesma, para que o peso lido seja igual ao peso da amostra de solo compactado em g/cm^3 .

Finalmente, extrai-se a amostra através do aparelho designado para o efeito, e coloca-se no recipiente adequado para que possa secar e para que posteriormente possa ser determinado o seu teor em água.

As amostras adicionais devem ser compactadas até que sejam estabelecidos todos os pontos de ambos os lados da curva de compactação.

4.2.2. Procedimento proposto por State of Nevada Department of Transportation: Materials Division

A Divisão de Materiais do Departamento de Transportes do estado de Nevada, EUA, indica um procedimento relativamente parecido com o anterior, distinguindo-se em alguns pontos, os quais se resumem nos parágrafos seguintes (SN DTMD, 2008).

Primeiramente, este processo permite executar ensaios em que as amostras são preparadas e compactadas imediatamente, e o teor em água adicionado é controlado durante o procedimento. Este processo depende do valor do peso específico seco obtido em aproximadamente 7 minutos (5 minutos de secagem na estufa e 2 minutos de espera até o peso estabilizar) e da própria configuração da curva de compactação, pois se o peso específico seco continuar a aumentar devem ser preparadas novas amostras. A cada amostra deve ser adicionada 2% de água.

As amostras são secas em 5 minutos, numa estufa, fogão elétrico ou a gás, desde que mantenha condições de aproximadamente 110 °C. O peso específico seco é obtido 2 minutos após estabilizar.

Sugere ainda 3 possíveis cenários que indicam quando o peso específico seco máximo é atingido: i) quando a última amostra compactada não ganha mais do que 1,4g; ii) quando aparece água na base ao remover o molde do suporte e iii) quando o martelo penetra a amostra em mais do que 6,35 mm (1/4 polegadas) no topo.

Confere sugestões que permitem distinguir quando o material tem humidade suficiente para começar o ensaio. Basta que ao apertar o solo este fique com a forma da mão, caso contrário deve ser adicionado um máximo de 30 ml de água, consoante a consistência do solo.

Resumidamente, é descrito um ensaio com 25 pressões em 4 camadas com uma mola de 37,5 lb. Não menciona a sequência em que deve ser posicionado o martelo durante as pressões mas refere que apenas deve ser dada uma cobertura uniforme à superfície do solo.

Ainda refere que uma pressão adequada é aquela em que o cilindro se separa do espaçador no topo.

4.2.3. Procedimento proposto: MCH-ISEC/2014

O procedimento definido no âmbito deste estudo, o qual se designa por MCH-ISEC/2014 (Método de Compactação de Harvard – ISEC/2014) baseou-se tanto nos procedimentos para o compactador de Harvard anteriormente apresentados como no procedimento de Proctor.

Pretende-se definir um procedimento de compactação em laboratório com a miniatura de Harvard que reproduza a compactação de Proctor, compactação correntemente utilizada em laboratório, a fim de ser possível estabelecer um termo de comparação entre ambos.

4.2.3.1. Preparação da amostra

À semelhança do procedimento de Wilson (1970) adaptado pela Humboldt (2003), considera-se a preparação das amostras prévia à compactação, relevante no sentido em que permite obter uma mistura homogénea entre água e as partículas constituintes dos solos.

Esta fase começa com uma secagem em estufa durante pelo menos 12 horas a 100°C, do material desagregado livre de grumos ou matéria orgânica. Após arrefecer prepara-se com o auxílio de uma balança com arredondamento às centésimas, uma proporção de 150g de solo ou mais num recipiente munido de tampa. À porção de solo deve ser acrescentada água corresponde à percentagem requerida. Para tal, tara-se a balança e a quantidade de água acrescentada é controlada através do peso em gramas que acrescenta ao solo. Recomenda-se que sejam preparadas 6 a 8 amostras cada uma com pouco mais de 150 g, às quais devem ser acrescentados 4,6,8,10,12,14,16,18% de água. No entanto, sugere-se que se comece a trabalhar com valores na ordem dos 8, 10% no caso de solos plásticos e, após o ensaio, decidir através da consistência do solo e da profundidade a que penetra o martelo se as amostras estão muito secas.

A amostra deve ser selada com película aderente e com a tampa do recipiente. Seguidamente, deve-se agitar o recipiente para garantir que a água embebe todas as partículas.

Por fim, se disponível, os recipientes devem ser colocados numa câmara de climatização, deixando o solo a repousar durante aproximadamente 12 horas. Durante este período ocorrem os mecanismos de interação entre partículas do solo, inclusivamente os minerais de argilas, com a água adicionada. Note-se que, na ausência de câmaras climatizadas, os recipientes com as amostras podem ficar imersos em água.

4.2.3.2. Procedimento de compactação

O procedimento de compactação inicia-se com a preparação do equipamento. O molde deve ser devidamente instalado no suporte com as varas bem enroscadas, assim como as roscas. No fundo do molde deve ser colocado um papel de filtro com um diâmetro aproximado ao diâmetro inferior cuja função é evitar que a fração sólida contacte com a base do suporte, permitindo a saída de finos pelos frisos durante a compactação. Adicionalmente, o papel de filtro facilita a remoção posterior do molde.

O martelo, por sua vez deve ser montado com a mola pretendida e com o respetivo espaçador. Devem ser salvaguardadas as fases de montagem descritas no ponto 4.1.2.2. referente à montagem do martelo.

O conteúdo de um recipiente anteriormente preparado deve ser despejado num tabuleiro ou equivalente, no qual será feito um cordão de solo por intermédio de uma espátula. Este deve ser dividido em porções equivalentes ao número de camadas pretendido. Com uma colher, colocar uma das porções no interior do molde (Figura 4.9). Por coincidência, cada porção geralmente corresponde a duas ou três colheres de chá, como referido por Wilson no seu procedimento.



Figura 4.9 - À esquerda, cordão de solo a dividir em porções equivalentes ao número de camadas. À direita, solo introduzido dentro do molde.

Durante a compactação deve ser assegurada a verticalidade do martelo (Figura 4.10) e as pressões devem seguir a sequência por camada proposta por Wilson (1970) e ilustrada na Figura 4.11.



Figura 4.10 - Compactação do solo com o martelo de Harvard. Pormenor da verticalidade que é necessária manter.

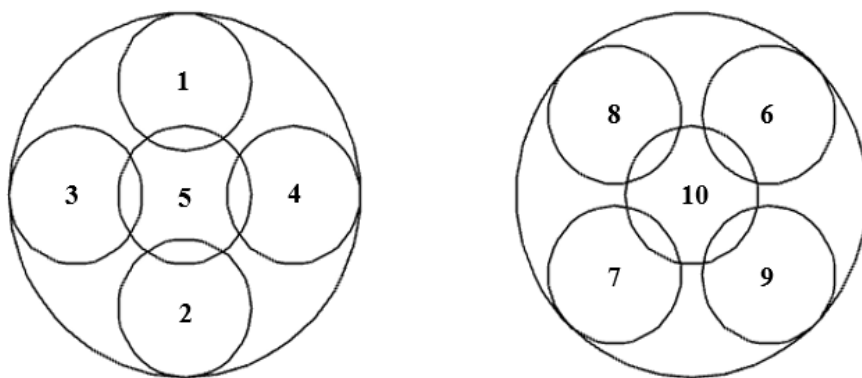


Figura 4.11 - Sequência de pressões adotada: à esquerda a primeira fase; à direita a segunda fase.

Refere-se ainda que, à semelhança do procedimento proposto por Wilson (1970), a taxa de compactação é de 10 pressões em 15 segundos.

Para as restantes camadas deve proceder-se da mesma forma até finalizar a compactação. Findo este processo, procede-se à remoção da alonga. À semelhança dos outros procedimentos, separa-se o conjunto (anel, molde e alonga) do suporte e coloca-se no aparelho para remover a alonga (Figura 4.12).

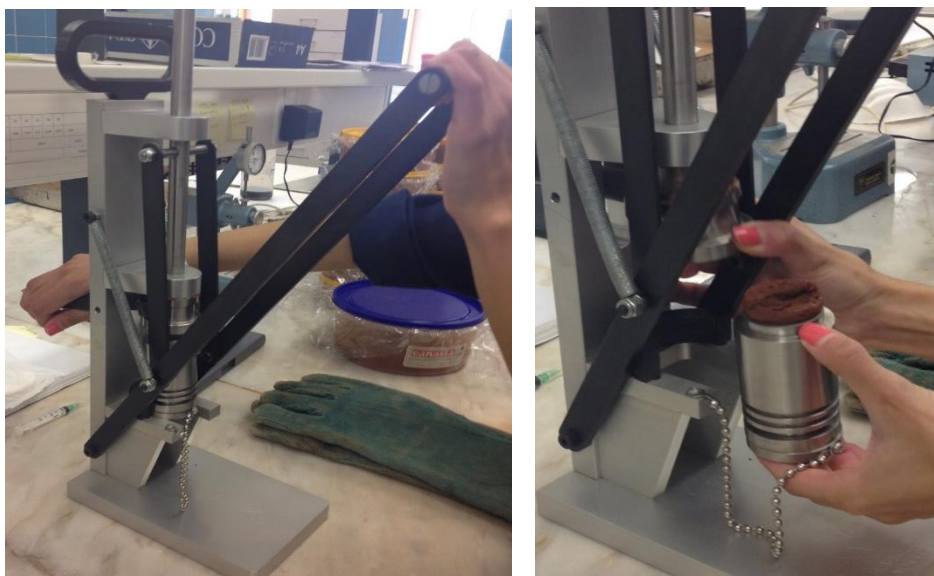


Figura 4.12 - Pormenor da remoção da alonga.

Retira-se em seguida o anel da base e o papel de filtro com o molde já no tabuleiro e rasa-se o topo e a base da amostra, extraindo o material excedente (Figura 4.13).



Figura 4.13 - Acabamentos dos tops da amostra.

Pesa-se e regista-se o peso do molde e solo compactado no seu interior (Figura 4.14).

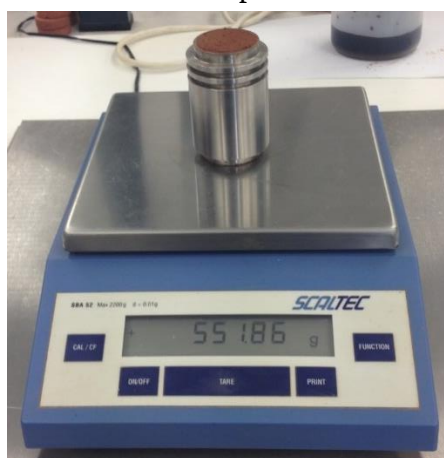


Figura 4.14 - Pesagem do molde.

A amostra de solo deve ser extraída do interior do molde, intacta, usando para o efeito a mesma estrutura de desmonte de amostras (Figura 4.15). Uma vez extraído (Figura 4.16) o provete deve ser dividido em cinco frações como se esquematiza na Figura 4.17.

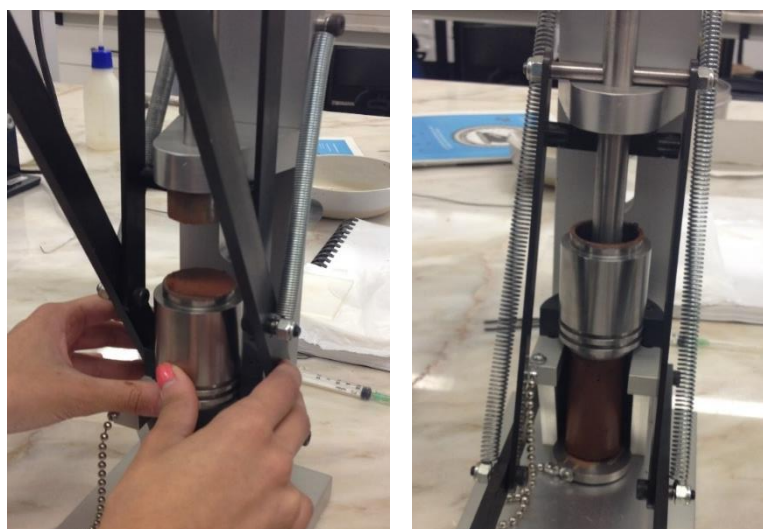


Figura 4.15 - Extração da amostra do interior do molde.



Figura 4.16 - Pormenor da amostra extraída.

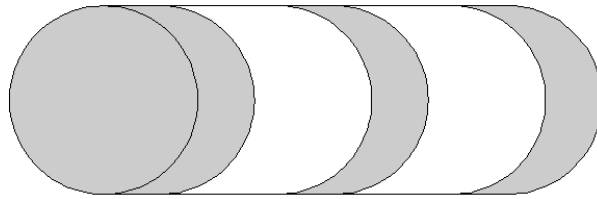


Figura 4.17 - Frações da amostra compactada a excluir (a sombreado) e frações a aproveitar (a branco).

As frações a sombreado devem ser excluídas, enquanto as restantes devem ser colocadas em cápsulas previamente pesadas. O peso das cápsulas com o solo húmido no seu interior deve ser registado (Figura 4.18). Seguidamente, são introduzidas numa estufa durante pelo menos 12 horas a 110°C.



Figura 4.18 - Em primeiro, corte do solo nas frações mencionadas. Seguidamente, colocação das amostras em cápsulas e pesagem das mesmas.

Após o período das 12 horas, as cápsulas com o material seco no seu interior devem arrefecer num exsiccador para preservar as condições de humidade atingidas na estufa para, após total arrefecimento ser registado o seu peso. A diferença das duas pesagens fornece o valor do teor em água que permite determinar peso específico seco necessário ao traçado da curva de

compactação. Note-se que esta última fase é um resumo do procedimento proposto pela NP84 para determinação do teor em água.

Contrariamente aos outros procedimentos mencionados, nos quais toda a amostra compactada era seca em estufa e pesada, aqui pesa-se apenas duas pequenas frações com pesos entre 30 e 45g cujo teor em água de ambas será usado para obter uma média, valor este correspondente ao teor em água da amostra. Caso a amostra preparada não for homogénea, ambas as frações apresentam teores em água ligeiramente diferentes.

O número de pressões bem como o número de camadas não é abordado propositadamente. A sua determinação resulta dum estudo sistemático que se discute em pormenor na secção 5.2.

4.3. Cuidados a ter

Os cuidados a ter durante os ensaios devem ser salvaguardados tanto ao nível da manipulação do equipamento, limpeza e manutenção e outros cuidados adicionais.

Recomenda-se que o martelo seja posicionado na vertical por forma a garantir uma correta compactação e aplicação da carga. A verticalidade da força imprimida no solo deve ser garantida. Destaca-se que o uso excessivo das molas pode interferir na energia de compactação mobilizada e transferida ao solo e pode ser iminente.

Cuidados acrescidos devem ser tomados relativamente ao uso do martelo, nomeadamente no decurso da sua montagem e desmontagem. A mola encontra-se em compressão dentro do cilindro e por este motivo recomenda-se que sejam retirados os parafusos antes das roscas aquando a desmontagem do martelo para a mudança da mola. Caso contrário, ao desapertar os parafusos a mola estende projetando o cilindro. As roscas tem função de travar a projeção do cilindro e manter a mola comprimida no interior. Para retirar as roscas deve pressionar-se o cilindro para baixo, comprimindo um pouco mais a mola e descomprimindo levemente em seguida até toda a mola regressar à posição inicial.

Obviamente, todas as regras de segurança próprias a ambientes laboratoriais devem ser respeitadas: uso de luvas ou pinças para remover as cápsulas da estufa, mangas compridas (com elástico) para evitar queimaduras nos braços que podem ocorrer quando da estufa não está suficientemente aberta ou tem tendência a fechar. Quando o material é arenoso, é aconselhável o uso de máscara de proteção para não inalar pó de sílica que pode provocar silicose.

4.4. Energia de compactação

4.4.1. Lei de Hooke

Ao compactar o solo, o trabalho realizado pelo sistema constituído pelo cilindro, mola e restantes acessórios corresponde ao trabalho realizado por um movimento harmónico simples (MHS). Este é um tipo de movimento periódico e ocorre quando a força que atua sobre determinada partícula é proporcional ao deslocamento da mesma relativamente à posição de equilíbrio e é dirigida sempre para a posição de equilíbrio (Rodrigues, 2014). Antes da aplicação

deste conceito à energia de compactação importa enunciar a lei de Hooke aplicada e este tipo de sistema.

Considere-se um sistema massa-mola, como por exemplo um bloco de massa m , ligado a uma mola. O mesmo bloco experimenta um deslocamento numa superfície horizontal sem atrito (Figura 4.19).

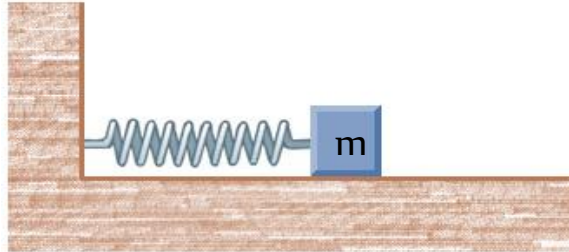


Figura 4.19 - Sistema massa-mola (adaptado de Nussenzveig, 1997)

Segundo a lei de Hooke, F_s é a força restauradora que está sempre dirigida para o ponto de equilíbrio e é sempre oposta ao deslocamento (Nussenzveig, 1997). Expressa-se da seguinte forma:

$$F_s = -k x$$

onde “ k ” é a constante elástica da mola e x é o deslocamento experimentado pelo bloco.

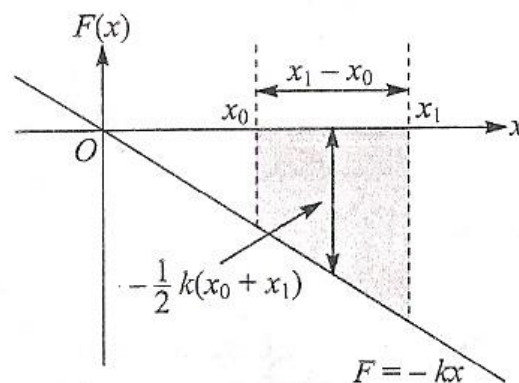


Figura 4.20 - Lei de Hooke. (Nussenzveig, 1997)

Segundo Nussenzveig (1997), quando a mola não está esticada ou comprimida o bloco encontra-se na posição de equilíbrio, isto é, o deslocamento é nulo ($x = 0$). Neste caso a força elástica é nula como se encontra ilustrado na Figura 4.21a.

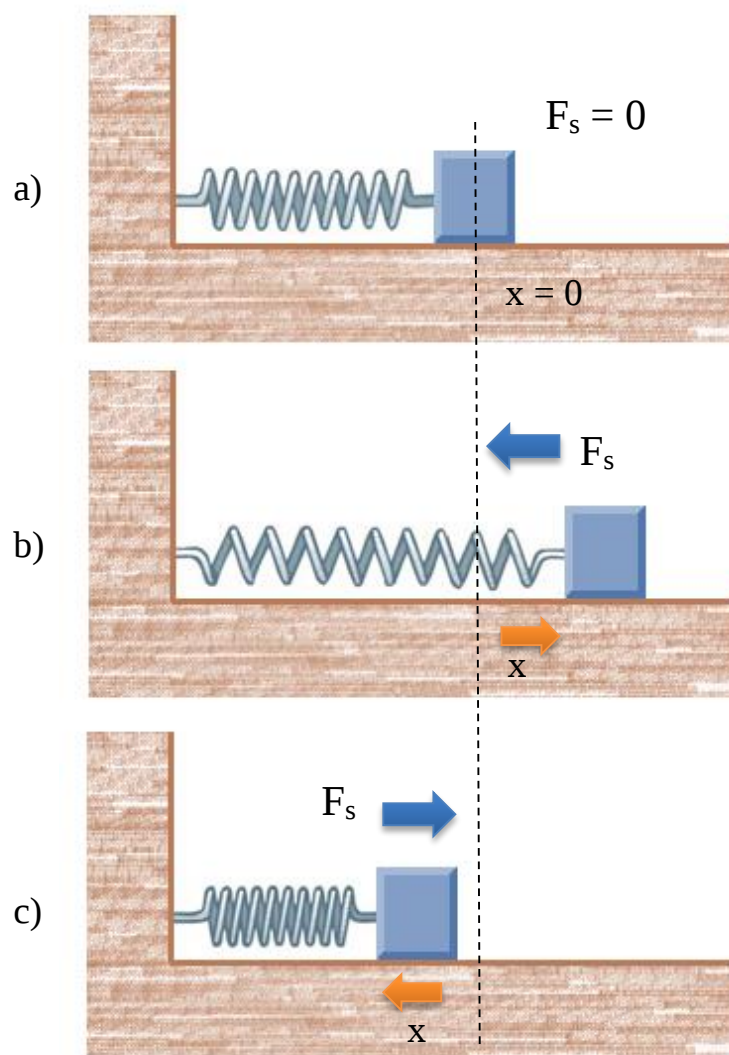


Figura 4.21 - Lei de Hooke (adaptado de Nussenzveig, 1997)

Na Figura 4.21b, a força restauradora dirigida para a esquerda é atrativa e tende a fazer com que a mola volte à posição de equilíbrio. A mola encontra-se em distensão e o deslocamento do bloco é positivo dirigido para a direita de $x=0$. Na Figura 4.21c a força restauradora é dirigida para a direita sendo portanto repulsiva, contrária ao deslocamento do bloco que é negativo e para a esquerda de $x=0$. A mola encontra-se em compressão.

Num corpo que se mova com um movimento harmónico simples (MHS), a aceleração é proporcional ao seu deslocamento, embora tenha um sentido oposto ao deslocamento. O mesmo corpo é designado por oscilador harmónico (Rodrigues, 2014).

Se o bloco se encontra numa posição $x = A$, então a aceleração inicial é:

$$a = - \frac{k}{m} A$$

Se o bloco continua até $x = -A$ a sua aceleração é:

$$a = \frac{k}{m} A$$

Se o bloco passa pelo ponto de equilíbrio, $a=0$.

O bloco oscila entre $-A$ e $+A$, sendo a força conservativa (Figura 4.22). Sob a ação desta força existe uma função energia que se conserva durante o movimento. Na ausência de atrito, o movimento continua para sempre. No entanto, sistemas reais, como o sistema constituído pelo compactador, estão sujeitos a atrito, portanto não oscilam indefinidamente.

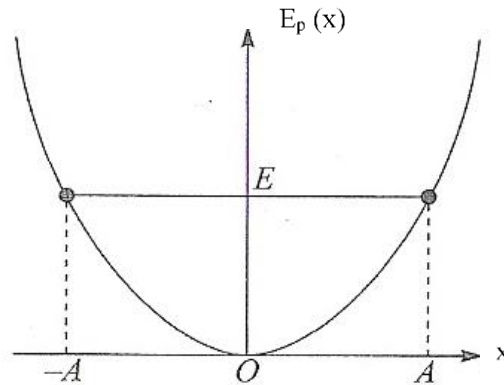


Figura 4.22 - Energia potencial do oscilador harmónico. (Nussenzveig, 1997)

Segundo Nussenzveig (1997), e considerando agora que o bloco é uma partícula, a lei horária do movimento é descrita pela expressão:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$$

Onde A é a amplitude máxima de oscilação de uma partícula e ω é a frequência angular.

$$\omega = \sqrt{k/m}$$

A função ilustrada na Figura 4.23 é uma função seno, função periódica de período 2π , o período τ de oscilação resultado:

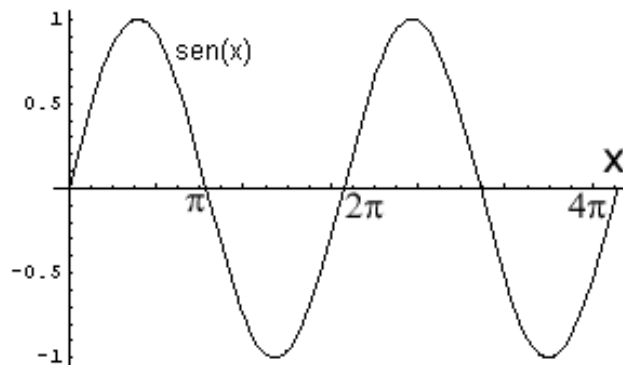


Figura 4.23 - Função seno

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{k/m}}$$

Designa-se φ por fase do movimento no instante t , e φ_0 é a fase inicial.

A frequência de oscilação é tanto maior quanto maior for a rigidez da mola, isto é quanto maior for a constante elástica, e é tanto maior quanto menor for a massa m da partícula. A velocidade instantânea da partícula obtém-se derivando a lei horária do movimento em relação ao tempo:

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega A \cos(\omega_t + \varphi_0)$$

A aceleração obtém-se pela segunda derivada da lei horária do movimento:

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \sin(\omega_t + \varphi_0)$$

Sabendo que $x = A \sin(\omega_t + \varphi_0)$ e $a = -\omega^2 x$ então,

$$a = -\omega^2 x \Rightarrow a = -\frac{k}{m} x \Rightarrow ma = -kx = F_s$$

Isto é, equivale à 2ª lei de Newton para o movimento da partícula.

4.4.2. Energia mecânica total no Movimento Harmónico Simples

Segundo Nussenzveig (1997), a conservação da energia mecânica total de uma partícula de massa m , no campo gravitacional próximo da superfície terrestre é dada pela soma da energia cinética e da energia potencial:

$$E_{\text{mecânica total}} = E_{\text{cinética}} + E_{\text{potencial}}$$

Isto é, a energia mecânica total de uma partícula é dada pela soma da sua energia cinética com a sua energia potencial. Esta última fica armazenada de forma “potencial” quando a partícula se encontra em repouso, e converte-se em energia cinética quando realiza trabalho. Desta forma a energia mecânica total conserva-se tal como conjectura a lei da conservação da energia.

Relativamente à Energia cinética, E_c é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m (-\omega A \sin(\omega_t + \varphi))^2$$

Como $\omega^2 = k/m \Rightarrow m = k/\omega^2$

$$E_c = \frac{1}{2} \frac{k}{\omega^2} \omega^2 A^2 \sin^2(\omega_t + \varphi)$$

Então fica:

$$E_c = \frac{1}{2} k A^2 \sin^2(\omega_t + \varphi)$$

No que se refere à Energia potencial E_p :

$$E_p = \frac{1}{2} k x^2$$

Aplicando a lei horária à expressão:

$$E_p = \frac{1}{2} k (A \cos(\omega_t + \varphi))^2 = \frac{1}{2} k A^2 \cos^2(\omega_t + \varphi)$$

Quanto à energia mecânica total é feita a seguinte abordagem:

$$E_m = E_c + E_p = \left[\frac{1}{2} k A^2 \sin^2(\omega_t + \varphi) \right] + \left[\frac{1}{2} k A^2 \cos^2(\omega_t + \varphi) \right]$$

Os gráficos da Figura 4.24 remetem para a evolução temporal de x , obtida pela lei horária do movimento, a velocidade instantânea da partícula de massa m , a energia potencial e a energia cinética durante um período de oscilação (Nussenzveig, 1997).

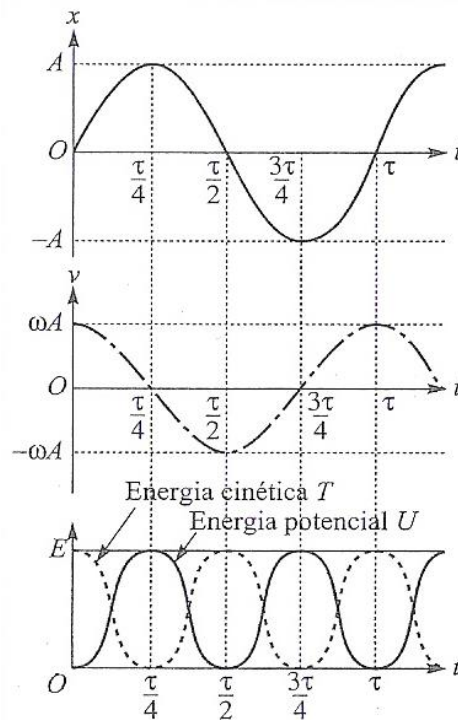


Figura 4.24 - Evolução temporal de x , v , E_p e E_c . (Nussenzveig, 1997)

Os esquemas da Figura 4.25, demonstram o aspeto do sistema massa-mola em intervalos de $\frac{1}{4}$ de período.

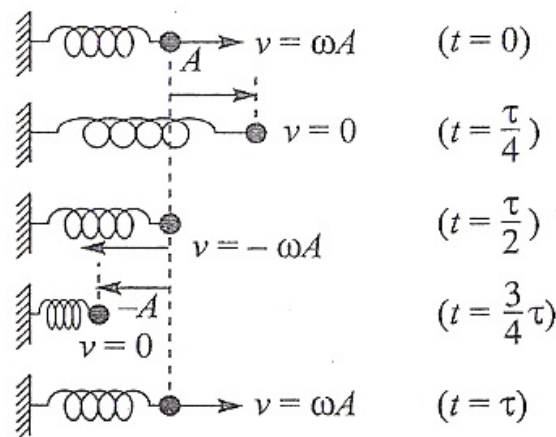


Figura 4.25 - Sistema massa-mola em intervalos de $\frac{1}{4}$ de período. (Nussenzveig, 1997)

Analisando as figuras, para $t=0$, a mola encontra-se na posição de equilíbrio e a partícula move-se para a direita com velocidade máxima (ωA). Neste caso a energia é puramente cinética. Para $t=\tau/4$ é máxima a distensão da mola e a velocidade nula. Como tal, a energia é totalmente potencial. Para $t=\tau/2$ a partícula passa pela posição de equilíbrio com velocidade máxima e oposta ($-\omega A$). Para $t=3\tau/4$, é máxima a compressão da mola, com velocidade nula e energia puramente potencial. Por fim, para $t=\tau$ a partícula volta à posição de equilíbrio (Nussenzveig, 1997).

4.4.3. Determinação da Energia de compactação através de Harvard

No sistema constituído pelo cilindro, mola e restantes acessórios a energia potencial ocorre sobre a forma de energia potencial elástica e sobre a forma de energia potencial gravítica.

A energia potencial elástica corresponde ao trabalho realizado pela força elástica ao deformar a mola e a energia potencial gravítica corresponde ao trabalho realizado pelo peso do martelo.

$$E_{potencial\ total} = E_{potencial\ gravitica} + E_{potencial\ elástica}$$

$$\Rightarrow E_p = mgh + \frac{1}{2} k A^2$$

A energia cinética neste caso é considerada nula uma vez que se pretende obter a distensão máxima da mola, o que conduz a uma velocidade instantânea da partícula igualmente nula. Logo a energia mecânica é totalmente potencial.

Para determinar a energia de compactação através da miniatura de Harvard tornou-se necessário medir a deformação de cada mola aplicando a lei de Hooke. Para o efeito, desenvolveu-se uma estrutura que possibilita a suspensão na vertical da mola numa das suas extremidade e a aplicação de uma determinada massa na outra extremidade (Figura 4.26).

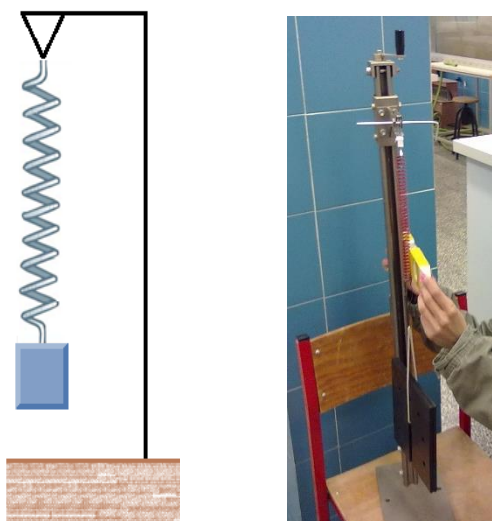


Figura 4.26 - Esquerda: Esquema estrutural do posicionamento da mola; Direita: Reprodução do esquema em laboratório.

Aplicando vários pesos na extremidade da mola e medindo-se a deformação desta em três troços distintos, no troço superior, no troço do meio e no troço inferior. Verificou-se que as medições efectuadas eram diferentes. A deformação da mola era maior no troço inferior relativamente ao do meio e a deformação do troço do meio era maior relativamente ao troço superior. Desta forma o comportamento da mola não aparentava ser homogéneo. Idêntico comportamento foi verificado para as restantes molas, pelo que abandonou-se este método de imediato. O uso excessivo das molas em laboratório pode ter afetado as suas propriedades resistentes, ocorrendo a relaxação das mesmas, e deste modo estar na origem do comportamento verificado. No entanto a hipótese deve ser descartada uma vez que estas raramente foram usadas.

Adotou-se então um novo método. Este consistia em fixar o martelo na vertical com a mola introduzida no seu interior, colocando-se pesos em cima do mesmo. Novamente, neste método

a energia cinética é considerada nula uma vez que se pretende obter a compressão máxima da mola, o que conduz a uma velocidade instantânea da partícula igualmente nula. Assim a energia mecânica é totalmente potencial somando as parcelas da energia potencial gravítica e elástica. Com este novo método é possível calcular a deformação sofrida pela mola através da leitura direta de “E” tal como se encontra no esquema da Figura 4.27. As várias dimensões do esquema representado nesta figura estão resumidas no Quadro 4.1.

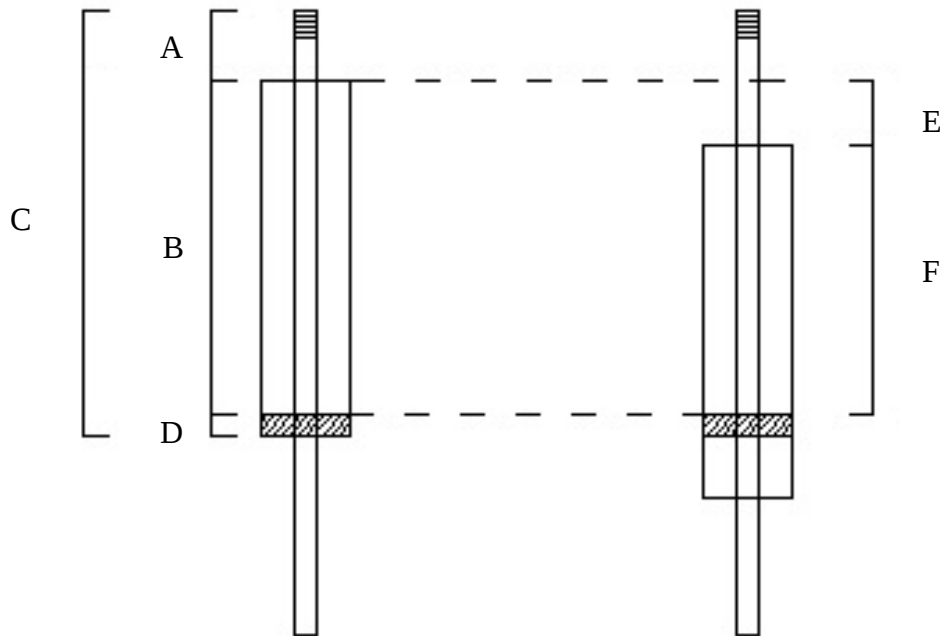


Figura 4.27 - Esquema de leitura indireta da deformação das molas. À esquerda, esquema do martelo na posição de equilíbrio. À direita, esquema do martelo sobre compressão.

Quadro 4.1 - Registo das medidas efetuadas ilustradas pela Figura 4.27

	Medida (mm)
A	39,5
B	197,0
C	247,2
D	10,7
h mola dentro do cilindro	186,3
E	Valor lido no defletómetro coincidente com a deformação da mola.
F	Calculado pela expressão: $F = h_{\text{mola dentro do cilindro}} - E$

A designação “E” corresponde ao comprimento que o martelo desce ao ser mobilizado pelos pesos e é lido através do defletómetro instalado sobre o mesmo para o efeito.

Os pesos foram colocados até provocar a máxima compressão nas molas, mobilizada pela descida completa do cilindro. Qualquer que seja a mola, a deformação máxima é de aproximadamente 5,7 cm.

Sabe-se que a mola no seu interior já se encontra comprimida e como tal, adota-se essa como a posição de equilíbrio que a mola atinge. A letra “D” corresponde à altura da chapa metálica contida no interior do cilindro. Refere-se ainda, que as leituras são feitas nas condições em que as molas são utilizadas em laboratório. Isto é, integradas no interior do cilindro, sob o estado de compressão a que são instaladas e em condições de atrito. Todas estas variáveis já são contabilizadas na determinação da deformação.

Com este valor, e sabendo o valor da força imprimida, é possível calcular a constante elástica, k . A Figura 4.28 ilustra duas fases distintas dos testes realizados.



Figura 4.28 - Esquerda: Leitura indireta da deformação das molas em laboratório. Direita: Pormenor dos pesos acima do martelo.

Conhecida a constante elástica, é agora possível determinar a energia de compactação imprimida para cada mola. Note-se que não se utilizou a mola referente a 37,5 lb porque com esta obter-se-iam valores intermédios fora do interesse deste estudo.

Quadro 4.2 - Cálculo da Energia de Compactação.

	MOLA 20 LB		MOLA 40 LB	
PESO DO COMPACTADOR, W_p (Kg)	1,226		1,23	
ALTURA DE QUEDA, h (m)	0,02		0,02	
AMPLITUDE DA OSCILAÇÃO A (m)	0,05217		0,05242	
CONSTANTE ELÁSTICA k (N/m)	1598,4		3649	
Nº PRESSÃO/CAMADA	30		30	
Nº CAMADA	5	4	5	6
VOLUME DO MOLDE (cm ³)	62,42		62,42	
ENERGIA POTENCIAL GRAVÍTICA (J)	0,24		0,24	
ENERGIA POTENCIAL ELÁSTICA (J)	2,18		5,01	
ENERGIA MECÂNICA ESTIMADA (J/pressão)	2,42		5,25	

ENERGIA MECÂNICA ESTIMADA (J/cm³)	5,81	4,64	12,63	15,15
---	------	------	-------	-------

O peso do compactador, w_p , engloba o peso do cilindro, o peso da mola instalada no seu interior e o respetivo espaçador adicionado. A altura de queda, h , corresponde à uma altura estimada que se supõe que se eleva o martelo a fim de o posicionar corretamente para executar a pressão seguinte. A amplitude de oscilação, A , correspondente à máxima deformação sofrida pela mola e é obtida pela interpolação entre os valores de deformação referentes às maiores massas colocadas.

A força é dada pela expressão:

$$F = m \times g, \text{ em que } g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

k , a constante elástica em N/m é obtida por:

$$k = \frac{F}{\text{deformação}}$$

Os resultados dos testes feitos para a determinação da energia para as duas molas estão resumidos no Quadro 4.2 e no Quadro 4.3

Quadro 4.3 - Valores referentes à mola de 20 lb

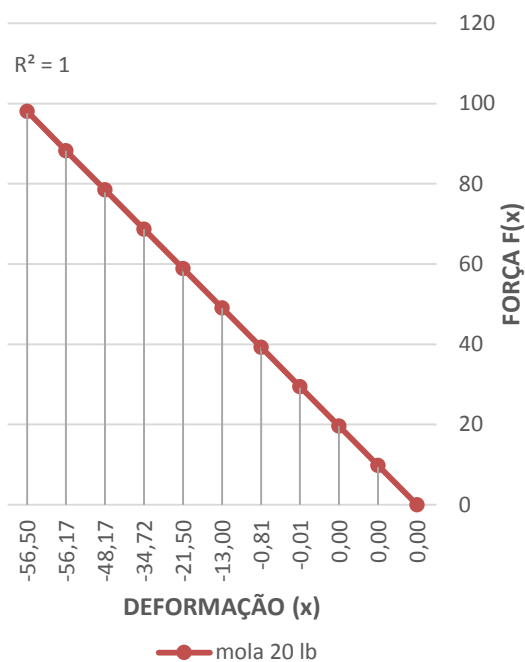
Massa kg	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Deformação (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	13,0	21,5	34,7	48,2	56,2	56,5
h_{mola} (mm)	186,3	186,3	186,3	186,3	185,5	173,3	164,8	151,6	138,1	130,1	129,8
Força (N)	0	9,81	19,62	29,43	39,24	49,05	58,86	68,67	78,48	88,29	98,1
k (N/m)	Rígida (k muito elevado)				46371	34659	27467	21654	17267	14459	12980
E_{pe} (J)	-	-	-	-	0,02	0,32	0,63	1,19	1,89	2,48	2,77

Quadro 4.4 - Valores referentes à mola de 40 lb

Massa kg	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Deformação (mm)	0,0	5,4	11,9	16,3	21,4	26,7	32,3	36,1	40,3	45,3	49,8	55,0
h_{mola} (mm)	186,3	180,9	174,4	170,0	164,9	159,6	154,0	150,2	146,0	141,0	136,5	131,3
Força (N)	88,29	98,1	107,9	117,7	127,5	137,3	147,2	157	166,8	176,6	186,4	196,2
K (N/m)	Rígida	18223	9085	7237	5952	5152	4561	4350	4143	3899	3739	3567
E_{pe} (J)	-	0,26	0,64	0,96	1,37	1,83	2,37	2,83	3,36	4,00	4,65	5,40

Os gráficos expostos na Figura 4.29 relativos às molas de 20 e 40 lb, apresentam a relação de linearidade entre a força imprimida sobre a mola e a deformação sofrida pela ação desta. Verifica-se que o método empregado para determinação da energia obedece à lei de Hooke. Uma vez que a deformação foi apenas conseguida por compressão, o gráfico apresenta unicamente a lei de Hooke para valores de $x < 0$, logo $F > 0$.

Lei de Hooke - Mola 20 lb



Lei de Hooke - Mola 40 lb

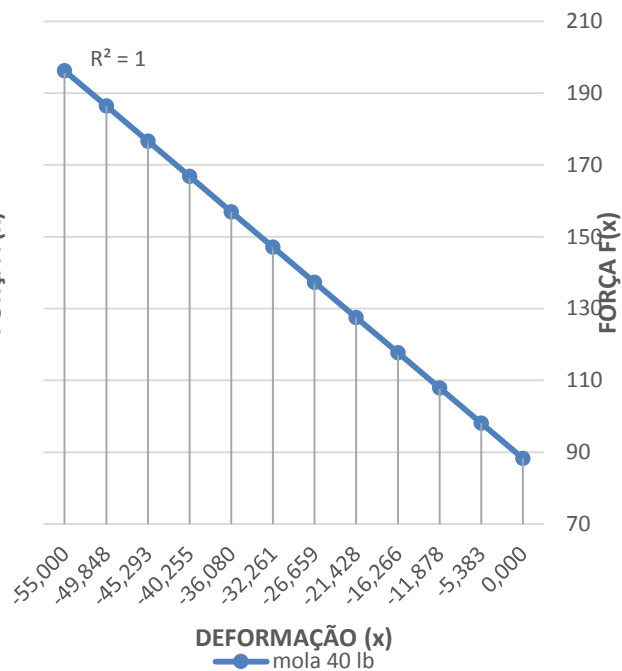


Figura 4.29 - Lei de Hooke para as molas 20 lb e 40 lb.

Quanto ao gráfico exposto pela figura 4.31 relativo às molas de 20 e 40 lb, este apresenta a variação da energia potencial relativamente à deformação sofrida por um oscilador harmónico o que se reflete na configuração parabólica do gráfico de ambas as molas. As deformações estudadas, por compressão, apenas permitiram obter pontos do lado esquerdo do gráfico.

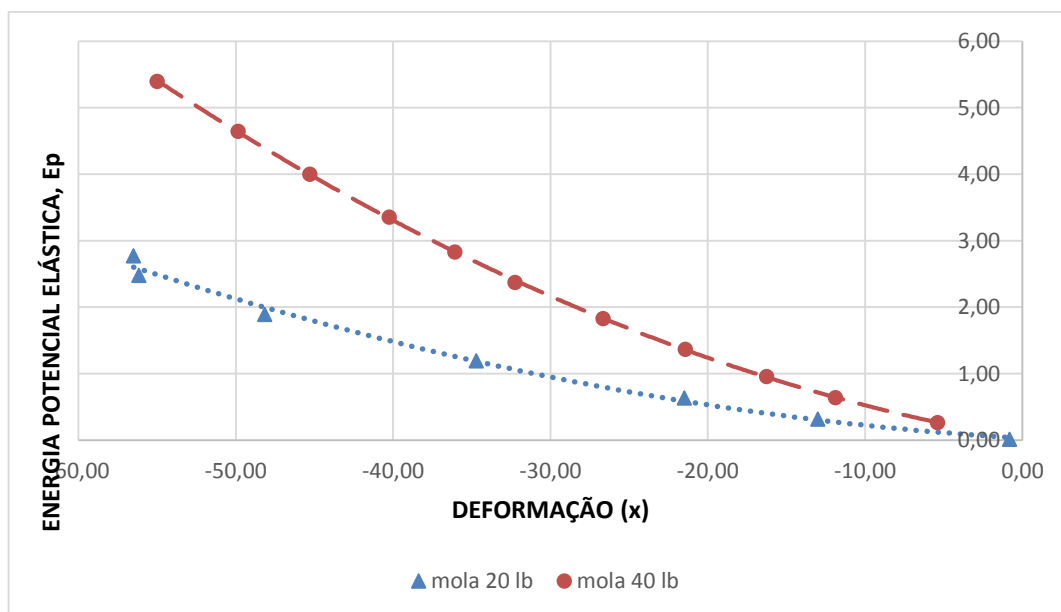


Figura 4.30 - Energia Potencial elástica para as molas 20 lb e 40 lb

4.4.4. Comparação com Proctor

A previsão do número de camadas necessárias é conseguida comparando as energias de compactação dos dois equipamentos. Note-se que esta previsão requer uma verificação subsequente como é abordado no Capítulo 5. No Quadro 4.5 resumem-se os resultados decorrentes da compactação leve e pesada de Proctor comparadas com Harvard, respetivamente às molas de 20lb e 40lb.

Quadro 4. 5 - Energia de compactação em Harvard e Proctor

Proctor		Harvard	
Compactação leve		Mola de 20 lb	
25 Impactos em 3 camadas		30 pressões em 5 camadas	30 pressões em 4 camadas
7,48 J/panc		2,42 J/panc	2,42 J/panc
561,00 J		363,00 J	290,40 J
0,59 J/cm ³		5,81 J/cm ³	4,64 J/cm ³

Proctor		Harvard	
Compactação pesada		Mola de 40 lb	
25 Impactos em 5 camadas		30 pressões em 5 camadas	30 pressões em 6 camadas
20,35 J/panc		5,25 J/panc	5,25 J/panc
2543,75 J		787,50 J	945,00 J
2,70 J/cm ³		12,63 J/cm ³	15,15 J/cm ³

Volume do molde	Volume do molde
944 cm ³	62,42 cm ³

Em termos de energia em Joules (N.m) a compactação de Proctor exerce maior energia de compactação por pressão que o compactador de Harvard. Tendo em conta as diferenças substanciais entre os compactadores, estes não podem ser comparados em termos da forma como imprimem a energia.

O compactador de Proctor transmite energia ao solo através da cadência do pilão. A energia potencial é praticamente gravítica e pode ser considerada constante em todas as pressões. A energia que é absorvida ou que se dissipa não é possível quantificar.

No caso do compactador de Harvard, como já foi referido a energia transmitida resulta da soma da energia potencial gravítica associada ao peso do martelo, caindo de uma altura estimada de 2 cm, e da energia potencial elástica que advém da deformação da mola. Esta energia corresponde aproximadamente a 90% da energia mecânica total estimada para a mola de 20 lb. Para a mola de 40 lb, esta corresponde aproximadamente 95% da energia mecânica total.

Contudo a energia calculada para o ensaio de compactação de Harvard é inferior à que realmente é aplicada. Deve ser considerada ainda a força que o operador exerce na compactação. Esta energia não é quantificável e a forma como o operador manipula o martelo influencia seguramente a energia potencial. O operador, ao compactar, pode não deslocar o cilindro ao ponto de deformar completamente a mola. Isto é, não deformar até ao máximo que

o compactador permite. Outra fonte de erro é, mesmo que a mola deforme até ao máximo, o operador pode exercer ainda uma força extra que vai incrementar a energia mecânica total. Complementarmente, a área de superfície do molde de Harvard corresponde a aproximadamente a 1/3 da área da superfície do molde de Proctor. Este facto sugere um maior efeito de confinamento que o molde de Harvard confere ao solo aquando a compactação através do pilão, devido à proximidade das paredes rígidas do molde. Reforçando esta ideia, o volume do molde de Harvard corresponde a aproximadamente 1/15 do volume do molde de Proctor. A análise conjunta de todas estas variantes pode justificar o excesso de energia por cm^3 de volume que o compactador de Harvard transmite ao solo, quando comparado com Proctor.

4.5. Influência do operador na compactação

A repetibilidade de resultados é um aspeto fundamental na investigação laboratorial. Todavia, por mais normalizados que sejam os ensaios, existem sempre fontes de erro que podem afetar os resultados. Atendendo à configuração do compactador de Harvard e ao seu processo completamente manual, supõe-se que uma fonte significativa de erros estejam associados ao manuseamento do equipamento pelo operador.

Para averiguar a influência do operador na compactação pediu-se a várias pessoas que efetuassem o mesmo ensaio de compactação com a miniatura de Harvard. Como tal, foi selecionado um grupo de operadores que integrava um operador licenciado em engenharia civil com conhecimentos específicos em geotecnia, A, um operador licenciado em engenharia civil sem conhecimentos específicos em geotecnia, B, e um operador alheio a qualquer conhecimento de engenharia civil, C.

Toma-se como referência um ensaio previamente realizado com o solo “Hospital Pediátrico” para a mola de 40 lb. Pretende-se averiguar, utilizando os mesmos teores de água utilizados para o ensaio de referência, se se verifica variação na configuração das curvas de compactação genéricas.

Os resultados obtidos resumem-se nos Quadros 4.6 e 4.7:

Quadro 4.6 - Resultados obtidos por cada operador para a mola de 40 lb.

Valores de referência					
w	5,82	7,83	10,10	12,54	13,94
γ_d	1,741	1,817	1,940	1,932	1,820
Operador A					
w	5,96	7,90	9,98	12,77	13,95
γ_d	1,741	1,842	1,977	1,861	1,767
Operador B					
w	6,09	7,49	10,14	12,43	13,75
γ_d	1,805	1,974	2,045	1,861	1,775
Operador C					
w	6,24	8,23	10,43	13,44	14,85
γ_d	1,743	1,813	1,941	1,886	1,796

Quadro 4.7 - Coordenadas do ponto máximo das curvas de compactação de cada operador para a mola de 40 lb

	Referência	Operador A	Operador B	Operador C
w opt	10,69	10,20	9,68	11,06
γ_d , máx	1,930	1,949	2,039	1,917

Representados estes resultados graficamente, obtém-se a Figura 4.31 que ilustra as curvas de compactação para os vários operadores bem como a curva de referência.

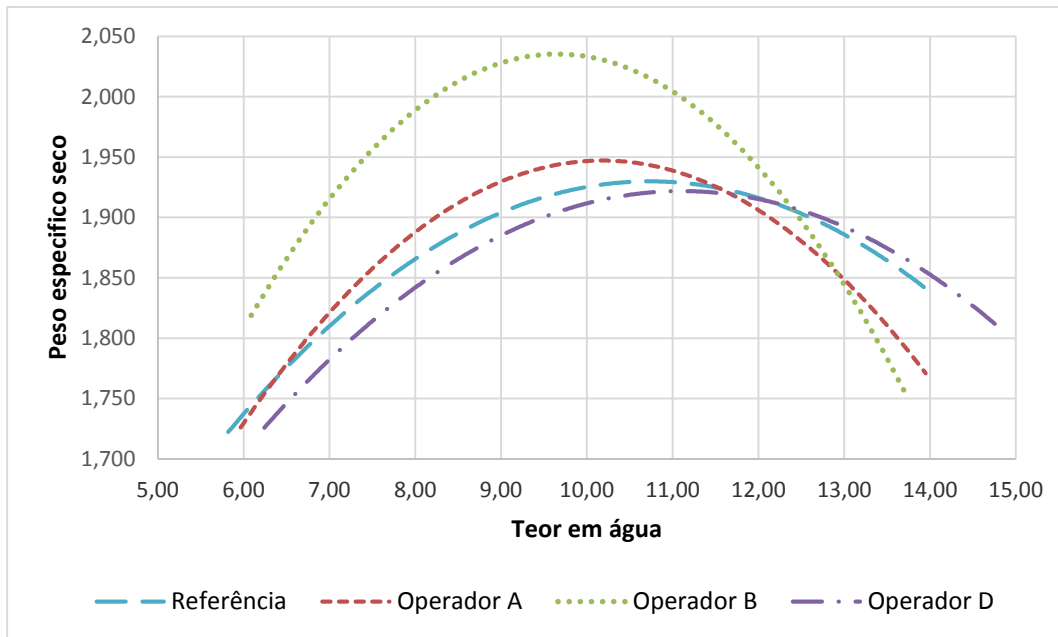


Figura 4.31 - Comparação entre curvas de compactação de cada operador para a mola de 40 lb.

Analisando os gráficos, verifica-se que a curva de compactação obtida pelo operador B foi a que obteve um maior peso específico seco máximo para o menor teor em água ótimo. As restantes duas curvas aproximam-se com um razoável grau de satisfação da curva de referência. Isto prova que o grau de conhecimento em relação ao equipamento e ao procedimento que lhe é associado não interfere com os resultados.

A altura do individuo poderá de certa forma influenciar o modo como o martelo pode ser manuseado. Por exemplo, um operador mais baixo, ao segurar o martelo tende a fletir os braços afastando-os do seu centro de massa, o que implica uma maior dificuldade em pressionar o cilindro para baixo e uma maior dificuldade em garantir a verticalidade do martelo.

A experiência e a repetição de ensaios, permite ao operador adquirir uma maior sensibilidade em relação à força que deve conferir em cada pressão, assim como à forma como deve manusear o martelo. Salienta-se, ainda, que existe uma tendência natural em criar “vícios”, passando a usar-se quase sempre a mesma energia em todas as pressões de todas as amostras, o que pode ser vantajoso conduzindo a ensaios mais coerentes em termos de energia.

5. RESULTADOS DA COMPACTAÇÃO

5.1. Ensaio de Proctor

O ensaio de compactação correntemente utilizado em laboratório é o ensaio de compactação de Proctor. Assim, ensaios de compactação de Proctor leve e pesado foram realizados para os cinco solos disponíveis obtendo-se as respectivas curvas de compactação, por forma a estabelecer um meio de comparação entre ambos os ensaios.

5.1.1. Resultados dos ensaios

Os resultados dos ensaios de compactação leve e pesada de Proctor efetuados para cada um dos solos ilustram-se na Figura 5.1.

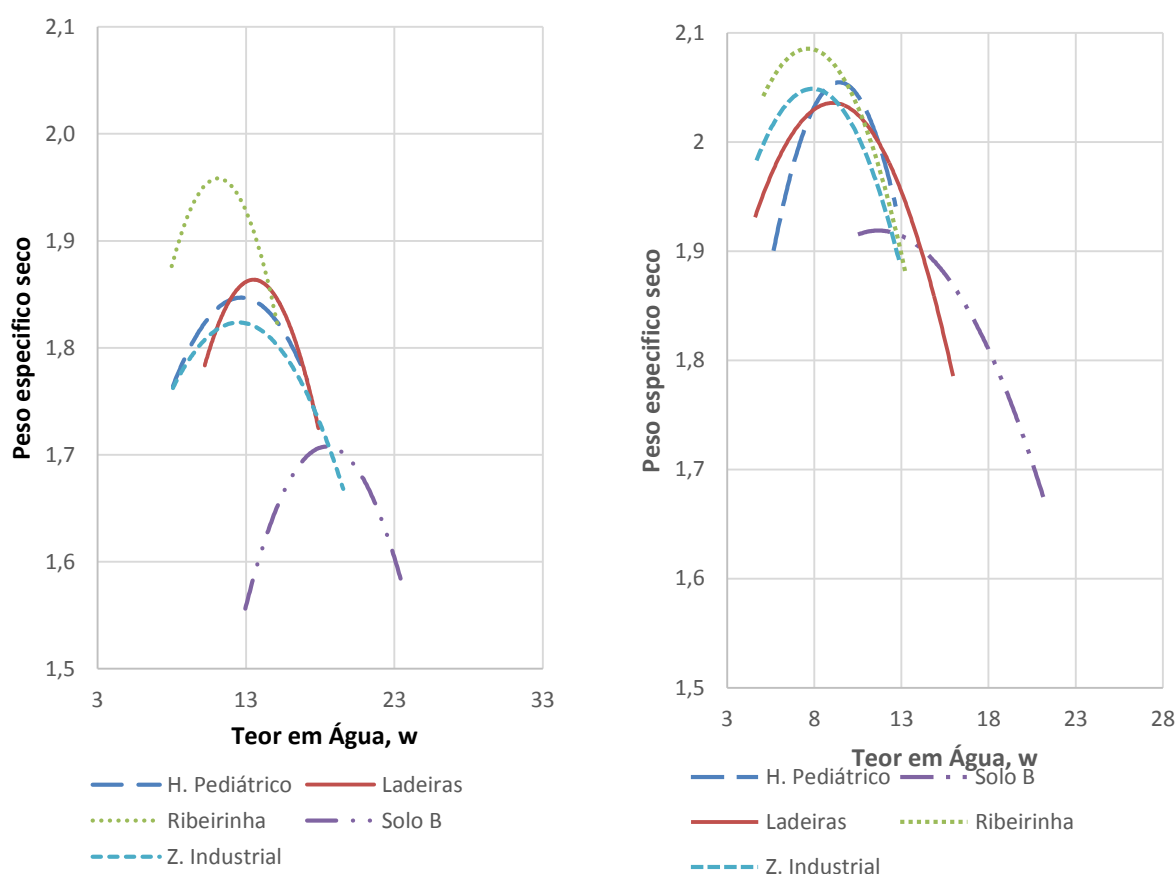


Figura 5.1- Curvas de compactação leve e pesada de Proctor, respetivamente, à esquerda e à direita.

No que respeita à compactação leve, cada curva do gráfico é constituída por seis a sete pontos. A norma E-197 (LNEC) refere que quatro pontos devem situar-se no ramo seco e que dois devem situar-se no ramo húmido. A dificuldade que se verificou em trabalhar com baixos teores em água nos solos complicou a realização de ensaios no ramo seco. As curvas incluem assim, três pontos no ramo seco, à esquerda do ponto máximo e três a quatro pontos no ramo húmido, à direita deste.

Analisando individualmente cada curva resultante dos ensaios de compactação leve, constata-se que o solo “Ribeirinha” é aquele que apresenta maior valor de $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ para o menor valor de $w_{\acute{o}pt}$. A forma da curva granulométrica apresentada para este solo nos capítulos 3.2.2. e 3.2.3. (granulometria extensa, indicador da presença de partículas de várias dimensões) conjugada com o valor mais baixo de índice de plasticidade ($IP=5$), justifica a curvatura mais fechada da curva de compactação deste solo.

O solo “Ladeiras”, segundo a classificação unificada no capítulo 3.2.5, remete para uma areia argilosa, à semelhança do solo “Zona Industrial” e “Hospital Pediátrico”, justificando-se assim a proximidade destas três curvas. Contudo como o solo “Ladeiras” apresenta uma granulometria extensa e um índice de plasticidade elevado (14), o $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ resultante do ensaio é superior ao dos outros dois solos referidos.

Quanto aos solos “Hospital Pediátrico” e “Zona Industrial”, estes apresentam $w_{\acute{o}pt}$ relativamente próximos, porém o primeiro confere um $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ mais elevado. Ainda, o seu índice de plasticidade é menor, assim como a granulometria do solo é extensa, pelo que a sua curva é ligeiramente mais fechada que a do solo “Zona Industrial”.

Finalmente, o “Solo B” apresenta uma curva granulométrica mal graduada, com uma percentagem de passados no peneiro n.º 200 igual a 91% não retendo qualquer material no peneiro n.º 10. A sua curva de compactação revela-se como a mais aberta de todas. Adicionalmente, o índice de plasticidade é o mais elevado de todos, o que também pode contribuir para essa configuração da curva. O seu carácter plástico exige um teor em água mais elevado para atingir o $\gamma_{d,m\acute{a}x}$, ($1,67 \text{ g/cm}^3$) o que se verifica uma vez que o solo apresenta um $w_{\acute{o}pt}$ (18,29%) elevado. Note-se que este peso específico seco é o menor valor obtido no conjunto de todos os ensaios de compactação leve.

No que remete para a compactação pesada, à semelhança do que foi feito para a compactação leve, cada curva inclui três pontos no ramo seco e três a quatro pontos no ramo húmido, à exceção da curva de compactação referente ao “Solo B”. Este solo revelou-se extremamente difícil de trabalhar com teores em água inferiores a 7%, não tendo sido possível obter mais pontos para o ramo seco. Daí resulta uma curva de compactação incompleta. Observando a configuração da curva, é possível afirmar que, caso os referidos pontos em falta no ramo seco tivessem sido obtidos, a curva se manifestaria bastante aberta.

Comparativamente aos outros solos, ao “Solo B” corresponde o $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ mais baixo, sendo necessário um $w_{\acute{o}pt}$ mais elevado que os teores em água ótimos dos outros solos para obter o máximo da curva.

Quanto às curvas referentes aos restantes quatro solos, por se localizarem na mesma área do gráfico, é fundamental que sejam analisadas em conjunto. Os solos “Ribeirinha” e “Zona Industrial” são representados por curvas de compactação com coordenadas ($w_{\acute{o}pt}$, $\gamma_{d,m\acute{a}x}$) relativamente próximas. Porém o solo “Ribeirinha” apresenta um $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ mais elevado. Isto, não só em relação ao solo “Zona Industrial”, mas relativamente aos outros. Ainda o $w_{\acute{o}pt}$ é o mais baixo de todos.

Quanto aos solos “Ladeiras” e “Hospital Pediátrico”, as curvas que os representam encontram-se à direita dos dois solos anteriormente descritos e situados ligeiramente mais abaixo.

Comparando ambas as curvas, observa-se que a curva de compactação para o solo “Hospital Pediátrico” é mais fechada, talvez devido ao facto de ter um índice de plasticidade mais baixo que o outro solo. Complementarmente, o ponto máximo da curva situa-se acima e à direita do ponto máximo da outra curva. Isto é, para o solo “Hospital Pediátrico” obtém-se um $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ para valores de w_{opt} também superior.

No que se refere à energia de compactação, do capítulo 4.4.4 resulta que na compactação leve (25 impactos em 3 camadas de solo), transmite-se uma energia ao solo de $0,59 \text{ J/cm}^3$. Na compactação pesada (25 impactos em 5 camadas de solo), transmite-se uma energia de $2,70 \text{ J/cm}^3$, o que corresponde a mais do quádruplo da energia transmitida na compactação leve. Este acréscimo de energia por unidade de volume (cm^3) reflete-se no deslocamento das curvas obtidas na compactação leve para cima e para a esquerda, sempre com o ramo húmido paralelo à curva do grau de saturação de 100% (Figura 5.3). Com mais energia obtém-se valores de $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ mais elevados para todos os solos conseguidos para w_{opt} mais baixos.

Os resultados dos ensaios de compactação leve e pesada, isto é, os valores do teor em água ótimo e peso específico seco máximo de cada solo resumem-se no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 - Valores de teor em água ótimo e peso específico seco máximo de cada solo, obtidos na compactação leve de Proctor.

	Compactação Leve		Compactação Pesada	
	W_{opt}	$\gamma_{d, \text{m}\acute{a}x}$ (g/cm^3)	W_{opt}	$\gamma_{d, \text{m}\acute{a}x}$ (g/cm^3)
Hospital Pediátrico	12,68%	1,847	9,40%	2,051
Solo B	18,29%	1,678	11,78%	1,922
Ladeiras	13,56%	1,867	8,99%	2,032
Ribeirinha	11,11%	1,958	8,99%	2,084
Zona Industrial	12,61%	1,828	7,88%	2,048

A cada curva polinomial corresponde um coeficiente de determinação “ r^2 ” que fornece a indicação da qualidade do ajuste da curva de compactação aos pontos resultantes de cada ensaio. No Quadro 5.2 resumem-se os vários coeficientes referentes a cada solo e tipo de compactação. Embora indiretamente, este coeficiente pode também avaliar o rigor dos ensaios realizados uma vez que, quanto maior for, menor é a dispersão dos resultados.

Quadro 5.2 - Coeficiente de determinação das curvas de compactação de cada solo.

	Compactação	Ribeirinha	Ladeiras	H.Pediátrico	Z. Industrial	Solo B
r^2	Leve	0,9821	0,9760	0,9311	0,9729	0,9517
	pesada	0,9616	0,982	0,9673	0,9833	0,9781

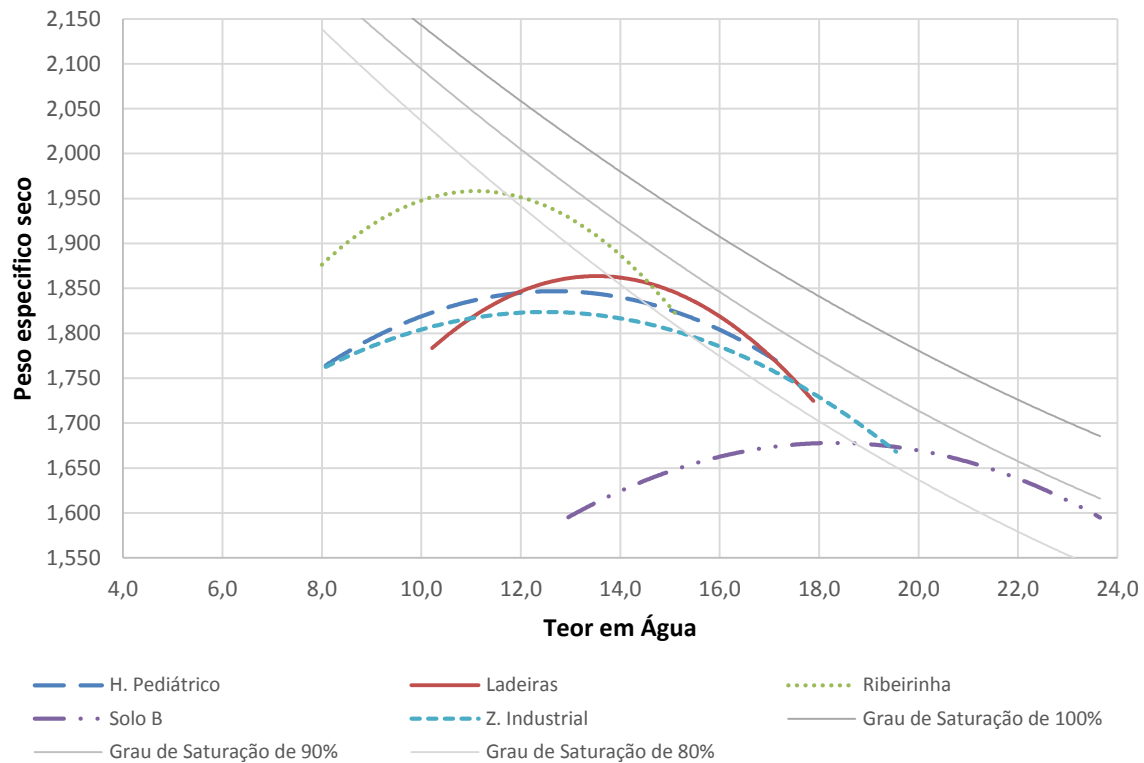


Figura 5.2 - Curvas de compactação leve de Proctor e variação de γ_d com W para os graus de saturação, S, 100%, 90% e 80%

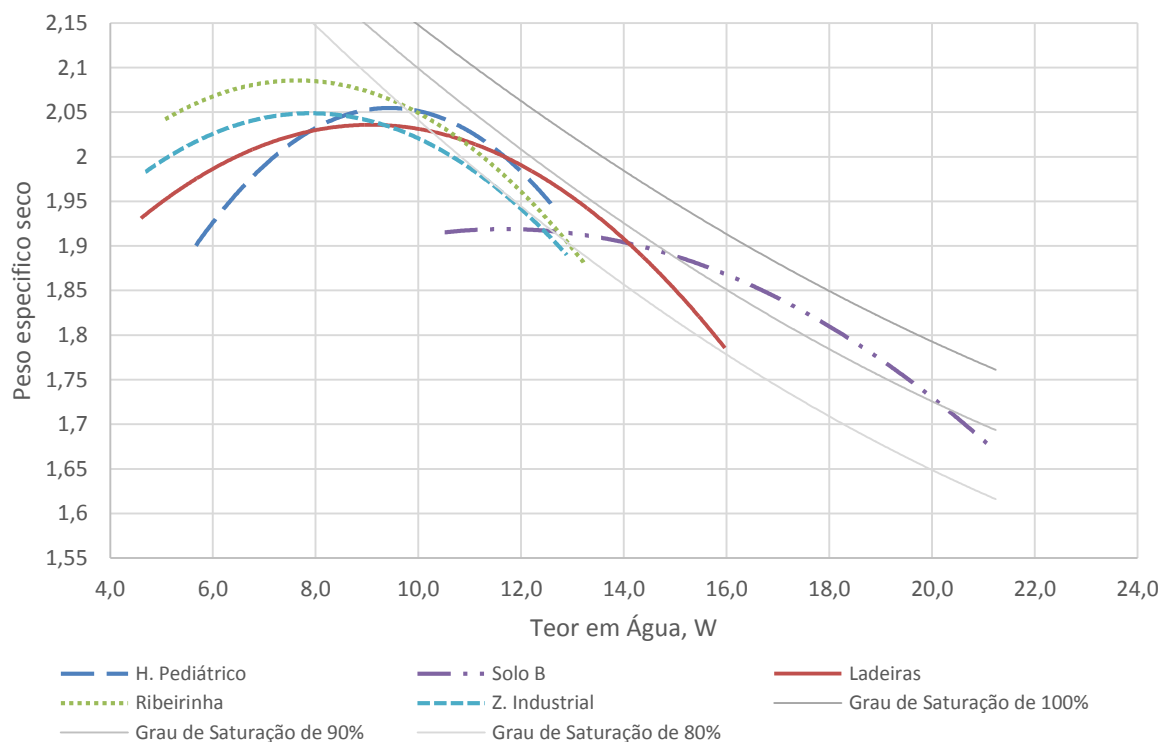


Figura 5.3 - Curvas de compactação pesada de Proctor e variação de γ_d com W para os graus de saturação, S, 100%, 90% e 80%

As Figuras 5.2 e 5.3 ilustram as curvas de compactação leve e pesada respetivamente, em relação às curvas de variação do peso específico seco com o teor em água para os graus de saturação de 100%, 90% e 80%. Verifica-se que o ramo húmido das curvas de compactação leve e pesada se desenvolve paralelamente à curva do grau de saturação de 100%, aproximando-se da curva referente ao grau de saturação de 90%.

5.1.2. Comentários adicionais aos ensaios de compactação de Proctor

Durante a execução dos ensaios de compactação de Proctor, sucederam algumas dificuldades durante a compactação de estados iniciais no ramo seco, trabalhando-se com teores em água baixos, tanto como na compactação no ramo húmido, trabalhando-se com teores em água em excesso.

No primeiro caso, a compactação de solos com baixos teores em água, (Capítulo 2.2.6.1), o aumento das tensões efetivas instaladas tem como consequência o aumento da resistência ao corte dos solos. Para estas condições revelou-se difícil remover a alonga na medida em que o solo se encontrava demasiado confinado no seu interior acabando por, ao retirá-la, quebrar o provete e deixar uma superfície desprovida de material. Quando tal não acontecia, nem a operação de alisamento da superfície nem o desmoldar do provete não eram tarefas de fácil execução.

No segundo caso, na compactação com solos em que é acrescentado um teor em água em excesso, a energia transmitida ao solo pode ser absorvida pela água, podendo haver um excesso de pressão neutra. Assim, não se proporciona a saída do ar dos vazios como se pretende com a compactação. Nestas condições, surgiram problemas como a profundidade de penetração do pilão normalizado que muitas das vezes transpunha o limite da alonga. Esses provetes eram descartados. Ao rasar a amostra, o material tendia a empolar impedindo que se conseguisse uma superfície plana.

Estes problemas são ainda mais evidentes para uma maior energia de compactação (compactação pesada). Nos casos em que o teor em água era reduzido, o solo estava compactado de forma tal que tornava praticamente impossível quebrar o provete para remover amostras do seu interior e efetuar a leitura do teor em água. Já nos casos em que o teor em água era elevado, o solo durante a compactação aderiu ao pilão formando uma espécie de “almofada” que o rodeava e que aumentava de espessura à medida que os impactos prosseguiam. Ocorreram também situações em que o solo pressionado pelo pilão descia empurrando o solo imediatamente ao lado. Desta forma ao longo do ensaio acumulava-se solo em torno das paredes do molde, formando uma espécie “cortina” cada vez maior com o número de impactos que acabava por conduzir à perda de material (Figura 5.4).



Figura 5.4 - "Cortina" de solo em torno das paredes do molde em consequência de um elevado teor em água.

Resta destacar que em laboratório torna-se imperativo repetir ensaios em ordem a obter um maior rigor nos resultados. Como tal, recomenda-se que os ensaios sejam executados nas mesmas condições de temperatura e humidade. Salienta-se ainda que todas as amostras foram preparadas na hora, ou seja, não foi deixado o solo a repousar durante 12 horas após a adição de água.

5.2. Estudo paramétrico do ensaio de Harvard

Na descrição do método MCH-ISEC/2014, proposto nesta dissertação, não foram abordados os pormenores referentes nem ao número de camadas nem às pressões. Adicionalmente, a determinação das energias de compactação identificou claras diferenças entre os dois ensaios. Assim, antes de proceder a ensaios de compactação com a miniatura de Harvard, torna-se necessário complementar e aferir a metodologia de ensaio. O estudo paramétrico do ensaio de Harvard, que aqui se apresenta, pretende definir o número de pressões, o número de camadas e que mola utilizar em cada caso. Esta sequência experimental permite, assim, completar a metodologia de ensaio proposta.

Esta análise de sensibilidade tem como referência os resultados obtidos na compactação de Proctor, utilizando-se, para o efeito, apenas o solo “Hospital Pediátrico”, selecionado por razões de disponibilidade e cujos resultados se apresentam no Quadro 5.6.

Quadro 5.3 - Valores de referência para o solo “Hospital Pediátrico”.

Compactação pesada	$w_{opt} = 9,40\%$	$\gamma_{d, \text{máx}} = 2,05 \text{ g/cm}^3$
Compactação leve	$w_{opt} = 12,68\%$	$\gamma_{d, \text{máx}} = 1,84 \text{ g/cm}^3$

5.2.1. Definição do número de pressões

Torna-se crucial definir em primeiro lugar o número de pressões para cada mola. Utilizando o teor em água de referência para todos os ensaios, ou seja $w_{opt}=12,68\%$ resultante do ensaio de

Proctor leve e fixando cinco como proposto por Wilson (1997), realiza-se um ensaio para cada mola (20, 37,5 e 40 lb) no qual se fazia variar o número de pressões.

Para cada mola, utilizaram-se quatro amostras que foram compactadas com 10 pressões em 15 segundos, com 20 pressões em 30 segundos, com 30 pressões em 45 segundos e finalmente com 40 pressões em 60 segundos. Para a mola de 40lb, efetuou-se um ensaio complementar para 50 pressões em 75 segundos. O Quadro 5.7 expõe todos os resultados obtidos.

Quadro 5.4 - Resultado do número de pressões para as molas de 20 lb, 37,5 lb e 40 lb.

Pressões/segundo	20 lb		37,5 lb		40 lb	
	W	γ_d	W	γ_d	W	γ_d
10 pan / 15 seg	12,29	1,801	12,65	1,930	12,36	1,960
20 pan / 30 seg	12,48	1,912	12,35	1,943	12,36	1,965
30 pan / 45 seg	12,58	1,931	12,39	1,951	12,17	1,970
40 pan / 60 seg	12,15	1,938	12,30	1,950	12,53	1,954
50 pan / 75 seg	-	-	-	-	12,63	1,936

Analisando os resultados obtidos para os ensaios efetuados, verifica-se que o peso específico seco aumenta com o número de pressões. Destaca-se que este aumento ocorre ao nível das centésimas, não sendo por isso tão significativo em termos técnicos. A evolução, contudo, não é linear como ilustra a Figura 5.5.

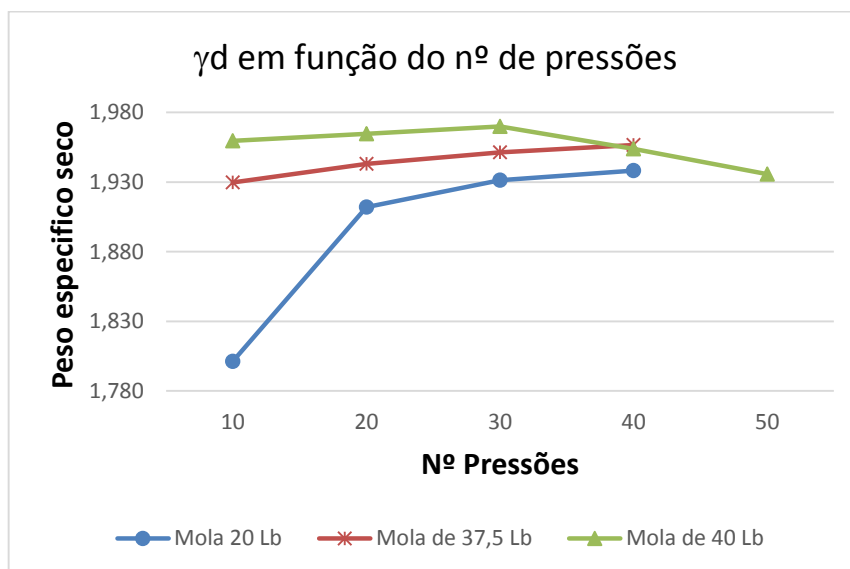


Figura 5.5 - Comparação entre a evolução do peso específico seco com o n.º pressões para as diferentes molas.

Para a mola de 20 lb a evolução do peso específico seco das 10 pressões para as 20 pressões aparenta ser mais acentuada que para as restantes molas. Além disso, verifica-se que a percentagem de erro é maior (Quadro 5.8).

Quadro 5.5 - Percentagem de erro do peso específico seco calculado para todas as molas.

	10 a 20 pressões	20 a 30 pressões	30 a 40 pressões	40 a 50 pressões
Mola de 20 lb	6,2%	1,0%	0,4%	-
Mola de 37,5 lb	0,7%	0,4%	0,3%	-
Mola de 40 lb	0,26%	0,27%	0,8%	0,9%

De 20 a 30 pressões, o peso específico seco continua a progredir com o número de pressões para todas as molas. No entanto este valor varia menos que de 10 a 20 pressões apresentando uma margem de erro de 0,3 a 1% para as três molas.

De 30 a 40 pressões, para as molas de 20 e 37,5 lb o peso específico seco continua a aumentar, embora com uma taxa significativamente inferior. Ao contrário das molas referidas a compactação com a mola de 40 lb resulta num decréscimo do peso específico seco a partir de 40 pressões em 60 segundos, sendo até inferior ao obtido para 30 pressões em 45 segundos. Para conferir esse valor repetiu-se o ensaio para as mesmas condições e o mesmo resultado foi obtido. Ainda, foi realizado um ensaio com 50 pressões em 75 segundos para verificar se o peso específico seco continuava a diminuir, facto que foi verificado.

Esta observação parece, numa primeira abordagem contrariar a ideia inicial de que o peso específico seco aumenta com a energia (número de pressões). Porém, supõe-se que esta diminuição se deve à rotura por corte do solo sob a ação da mola. Certamente que uma futura análise mais cuidadosa deste fenómeno, com avaliação das tensões aplicadas pela compactação e resistência do solo, corroborará esta hipótese.

Deste primeiro estudo resultada que a opção mais eficiente do número de pressões a adotar para todos os solos é 30 pressões em 45 segundos. A partir de 20 pressões o aumento do peso específico seco não é tão relevante e 30 pressões não acrescenta muito em termos de compactação. Porém, o aspeto visual da superfície dos provetes após compactação de cada camada bem como a quase ausência de solo nas paredes internas do molde (Figura 5.6) são claros indícios de uma melhor homogeneidade na compactação das camadas. Assim, para garantir um maior rigor na compactação propõe-se que o ensaio seja realizado com 30 pressões em 45 segundos. Um pormenor do acabamento da face lateral duma amostra é ilustrado na Figura 5.7.



Figura 5.6 - Superfície da amostra compactada com a mola de 20 lb com 10 pressões em 15 segundos, 20 pressões em 30 segundos, 30 pressões em 45 segundos, 40 pressões em 60 segundos.



Figura 5.7 - Acabamento da superfície lateral da amostra compactada com a mola de 20 lb com 30 pressões.

5.2.2. Problemática das molas na compactação leve e pesada

Neste capítulo pretende-se selecionar duas molas, entre as três disponíveis, que permitam com 30 pressões em 45 segundos e um número fixo de camadas igual a 5 reproduzir os valores tomados como referência de teor em água ótimo e peso específico seco máximo, obtidos para compactação leve e pesada de Proctor. Para tal, realizaram-se dois ensaios para cada uma das molas escolhidas (20 lb e 40 lb) utilizando os $w_{opt, pesada} = 9,40\%$ e $w_{opt, leve} = 12,68\%$.

Os resultados obtidos com $w_{opt, leve} \approx 12,68\%$, 5 camadas e 30 pressões em 45 segundos são apresentados no Quadro 5.9.

Quadro 5.6 - Resultados da compactação com Harvard com $w_{opt, leve} \approx 12,68\%$.

	Mola de 20 lb	Mola de 40 lb
W	12,51%	12,17%
γ_d (g/cm ³)	1,936	1,970

Objetivava-se obter com um teor em água próximo de 12,68% um valor de peso específico seco próximo de 1,84 g/cm³ com uma das molas utilizadas. A mola de 20 lb é a que confere um γ_d mais baixo. Presume-se que, diminuindo o número de camadas e consequentemente a energia de compactação transmitida, o peso específico seco possa aproximar-se ainda mais do valor de referência. Como o peso específico seco obtido com a mola de 20 lb já é superior ao de referência para compactação leve (1,84 g/cm³), não foi necessário utilizar a mola de 37,5 lb.

Repetindo os mesmos ensaios, com o teor de água obtido para a compactação pesada ($w_{opt, pesada} \approx 9,40\%$), 5 camadas e 30 pressões em 45 segundos obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 5.10 para ambas as molas:

Quadro 5.7 - Resultados da compactação com Harvard com $w_{opt, pesada} \approx 9,40\%$.

	Mola de 20 lb	Mola de 40 lb
W	9,07%	9,12%
γ_d (g/cm ³)	1,897	1,957

Esperava-se que, com um teor em água próximo de 9,40%, se obtivesse com uma das molas um peso específico seco próximo de $2,05 \text{ g/cm}^3$. A mola de 40 lb foi a que conferiu maior valor de γ_d , igual a $1,957 \text{ g/cm}^3$. Se se aumentar o número de camadas talvez seja possível chegar ao valor de referência para compactação pesada ($2,05 \text{ g/cm}^3$).

Desta análise conclui-se, tal como seria de esperar, que para a compactação leve adota-se a mola de 20 lb na compactação leve de Harvard e a mola de 40 lb na compactação pesada, uma vez que a mola mais deformável imprime menos energia e vice-versa.

Do estudo paramétrico falta definir o número de camadas para ambas as compactações. Descarta-se a hipótese de trabalhar com a mola de 37,5 lb uma vez que se obteria com a mesma, valores intermédios fora do interesse deste estudo.

5.2.3. Definição do número de camadas

Como se havia afirmado anteriormente, Wilson (1970) propusera realizar um ensaio com cinco camadas. A State of Nevada DMTD (2009) propusera quatro, mas com a mola de 37,5 lb a qual não se integra no estudo no âmbito da metodologia MCH-ISEC/2014 proposta nesta dissertação.

No entanto a questão que se coloca é se será possível reproduzir através da miniatura de Harvard, o mesmo efeito em termos de compactação do ensaio de Proctor um ensaio normalizado e correntemente utilizado.

Então, já definido o número de pressões a empregar em cada camada e escolhidas molas a utilizar na compactação leve e pesada, resta definir o número de camadas.

No capítulo 4.4.3. estimou-se a energia mecânica por unidade de volume, fazendo variar o número de camadas para cada mola, no sentido de estabelecer um termo de comparação entre ambas. Com este estudo constatou-se que para a mola de 20 lb a diminuição do número de camadas para quatro resulta numa menor energia imprimida no solo e que para a mola de 40 lb o aumento do número de camadas para seis resulta numa maior energia imprimida no solo. Consequentemente realizou-se um ensaio que permita analisar a variação do peso específico seco com o número de camadas.

Para reproduzir a compactação pesada utilizou-se a mola de 40 lb, com 30 pressões em 45 segundos, um teor em água próximo de 9,40% e 6 camadas. O Quadro 5.11 compara os resultados obtidos com cinco e seis camadas.

Quadro 5.8 - Análise da variação do peso específico seco com o número de camadas para compactação pesada.

	Proctor	Harvard - Mola de 40 lb	
	Compactação pesada	5 Camadas	6 Camadas
W	9,40%	9,12%	9,28%
$\gamma_d \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2,05	1,957	2,026

Verifica-se que o peso específico seco obtido com 6 camadas para a compactação pesada se aproxima do valor de referência obtido no ensaio de Proctor, não havendo necessidade de aumentar mais o número de camadas.

Para reproduzir a compactação leve utilizou-se a mola de 20 lb, com trinta pressões em 45 segundos, um teor em água próximo de 12,68% e quatro camadas. Como indica o Quadro 5.12, o γ_d obtido em Harvard para quatro camadas não diminuiu o suficiente a ponto de se aproximar do γ_d de referência para a compactação leve (1,84 g/cm³). Realizou-se ainda um ensaio extra com três camadas cujos resultados também estão no Quadro 5.12.

Quadro 5.9 - Análise da variação do peso específico seco com o número de camadas para compactação leve.

	Proctor	Harvard - Mola de 20 lb		
	Compactação leve	5 Camadas	4 Camadas	3 Camadas
W	12,68 %	12,51%	12,37%	12,17%
γ_d (g/cm ³)	1,84	1,936	1,908	1,897

O γ_d obtido para 3 camadas é ainda superior ao valor de referência para compactação leve. Como a diferença entre γ_d para quatro camadas e o valor de referência não é muito superior à diferença entre γ_d para 3 camadas e o valor de referência, exclui-se a hipótese de reproduzir a compactação leve em Harvard com três camadas. Além disso, um ensaio com três camadas resulta numa amostra de solo pouco compacta, pouco homogênea sendo possível distinguir visualmente a interface entre as camadas.

5.2.4. Conclusão do estudo paramétrico

O estudo paramétrico efetuado permite concluir que cada camada da amostra deve ser compactada com 30 pressões em 45 segundos por forma a garantir um maior rigor na compactação, como já foi referido no capítulo 5.2.1. Pode também distinguir-se um ensaio de Harvard como compactação leve através da mola de 20 lb e pesada através da mola de 40 lb. Para o solo “Hospital Pediátrico”, verifica-se que se deve utilizar quatro e seis camadas para se alcançarem resultados de compactação leve e pesada, respetivamente, próximos dos obtidos com o ensaio de Proctor. Contudo, tendo este estudo paramétrico incidido num único solo, não é possível apresentar uma generalização sobre o número de camadas a utilizar. Surge aqui a questão sobre se se deve utilizar 5 camadas tanto para a compactação leve como para a pesada, ou se se deve utilizar 4 camadas para a compactação leve e 6 para a pesada. Desta forma a conclusão sobre o número de camadas a utilizar será abordada no capítulo 5.3.1, juntamente com a apresentação dos resultados dos ensaios de compactação de Harvard. As principais conclusões do estudo paramétrico estão no Quadro 5.13.

Quadro 5.10 - Resumo do ensaio paramétrico efetuado através do solo "Hospital Pediátrico" para definição do n.º de pressões, das molas para cada compactação e do n.º de camadas.

Ensaio	Mola	Pressões	Camadas	W (%)	γ_d (g/cm³)	Obs.
Definição do n.º de pressões	20 lb	10 /15 seg.	5	12,29	1,801	O γ_d aumenta até 30 pressões. A partir daí, a evolução do γ_d não justifica o aumento de pressões.
		20 /30 seg.		12,48	1,912	
		30 /45 seg.		12,58	1,931	
		40 /60 seg.		12,15	1,938	
	40 lb	10 /15 seg.	5	12,36	1,960	
		20 /30 seg.		12,36	1,965	
		30 /45 seg.		12,17	1,970	
		40 /60 seg.		12,53	1,954	
		50 / 75 seg.		12,63	1,936	
	Conclusão: optou-se por 30 pressões em 45 segundos.					
Definição da mola para compactação leve	20 lb	30 /45 seg.	5	12,51	1,936	>1,84
	40 lb			12,17	1,970	>>1,84
	Conclusão: Harvard leve com a mola de 20 lb.					
Definição da mola para compactação pesada	20 lb	30 /45 seg.	5	9,07	1,897	<< 2,05
	40 lb			9,12	1,957	< 2,05
	Conclusão: Harvard pesada com a mola de 40 lb.					
Definição do n.º de camadas	20 lb	30 /45 seg	5	12,51	1,936	γ_d diminuiu com 4
			4	12,37	1,908	
	40 lb		5	9,12	1,957	γ_d aumentou com 6
			6	9,28	2,026	
	Conclusão: é necessário averiguar se esta tendência se verifica para todos os solos de forma a definir o n.º de camadas para Harvard leve e pesado.					

5.3. Ensaio de Harvard

Os ensaios de Harvard foram realizados em todos os solos disponíveis, com a finalidade de, numa primeira fase verificar na prática as conclusões do estudo paramétrico efetuado, concluindo deste modo a definição do número de camadas. Numa segunda fase, pretende-se comparar o comportamento dos solos no ensaio de Harvard comparando os resultados obtidos com os do ensaio de Proctor. Como tal, devido à incerteza sobre o número de camadas a utilizar, realizaram-se ensaios com a mola de 20 lb com 4 e 5 camadas e com a mola de 40 lb com 5 e 6 camadas.

5.3.1. Comparação de resultados

Os resultados dos ensaios de compactação com a miniatura de Harvard estão ilustrados na Figura 5.8, sendo apresentados os coeficientes de correlação e os teores ótimos e os pesos específicos máximos nos Quadros 5.14 e 5.15.

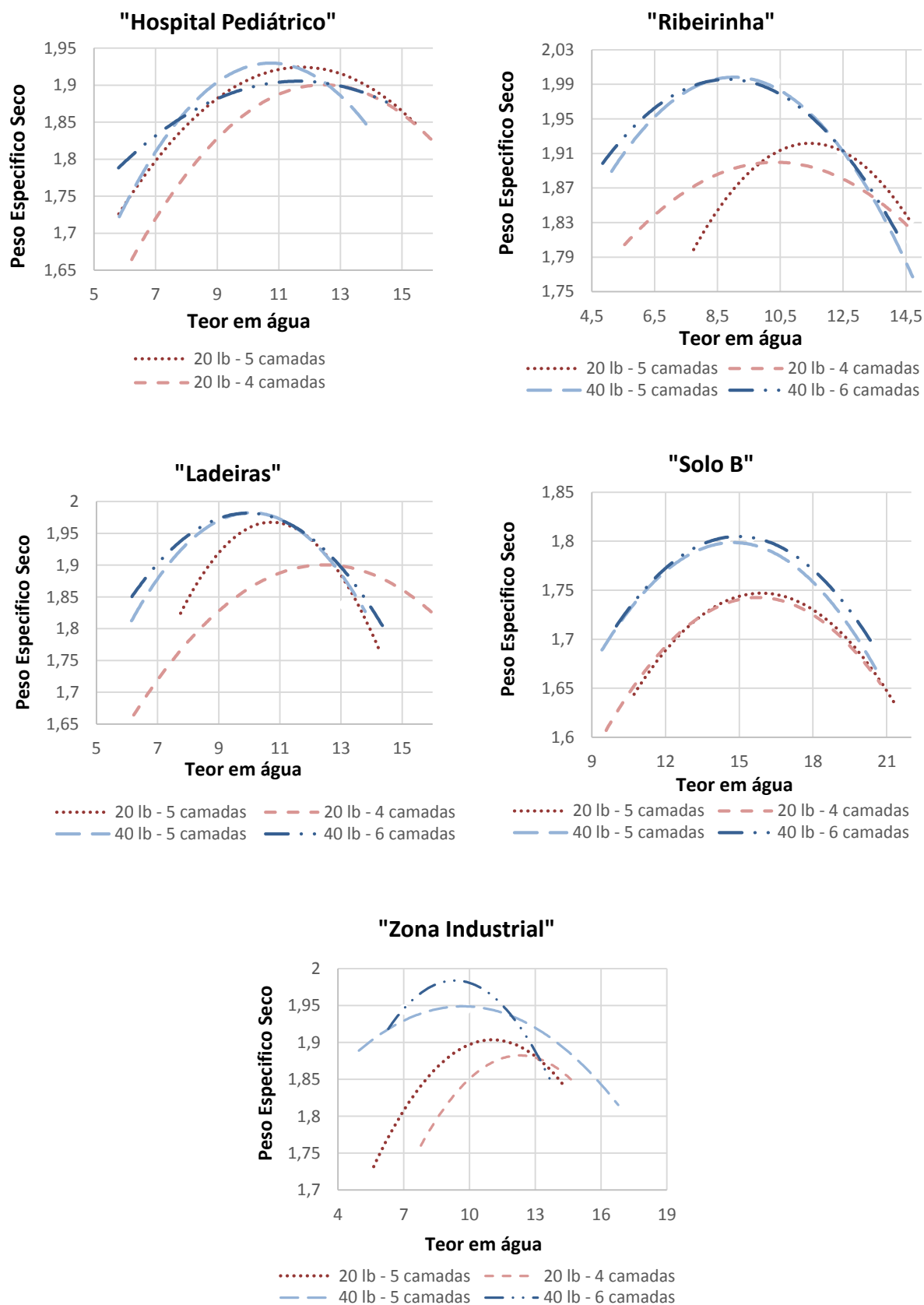


Figura 5. 8 - Curvas de Compactação em Harvard para ambas as molas de 20 (com 4 e 5 camadas) e de 40 lb (com 5 e 6 camadas).

Quadro 5.11 - Coeficiente de determinação, r^2 , das curvas de compactação de cada solo para a mola de 20 lb e de 40 lb.

Mola	Camadas	H.Pediátrico	Ladeiras	Ribeirinha	Solo B	Z. Industrial
20 lb	5	0,9204	0,9032	0,9852	0,9238	0,9419
	4	0,9100	0,9578	0,8191	0,8976	0,9773
40 lb	5	0,9750	0,9947	0,8763	0,9712	0,9695
	6	0,9476	0,9371	0,8247	0,9698	0,9987

Quadro 5.12 - Coordenadas do ponto máximo de cada curva de compactação para a mola de 20 lb e 40lb.

Mola	Camadas	H.Pediátrico		Ladeiras		Ribeirinha		Solo B		Z. Industrial	
		W_{opt} (%)	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (g/cm ³)	W_{opt} (%)	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (g/cm ³)	W_{opt} (%)	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (g/cm ³)	W_{opt} (%)	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (g/cm ³)	W_{opt} (%)	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (g/cm ³)
20 lb	4	12,39	1,896	11,86	1,903	10,23	1,895	15,97	1,754	12,28	1,882
	5	11,78	1,926	11,20	1,928	11,48	1,924	16,05	1,756	11,14	1,909
40 lb	5	11,75	1,909	9,98	1,985	8,87	1,998	14,95	1,804	9,36	1,986
	6	10,72	1,928	10,08	1,986	8,99	1,995	14,91	1,807	9,59	1,946

Analisando as curvas de compactação e os respectivos valores de $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ obtidos, verifica-se que para a mola de 20 lb todos os solos tendem a apresentar valores mais baixos de $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ e mais próximos dos valores obtidos no ensaio de compactação de Proctor para 4 camadas relativamente aos ensaios com 5 camadas.

Para a mola de 40 lb os resultados já não são consistentes para todos os solos. Atendendo ao ensaio efetuado e descrito no capítulo 5.2.3. esperavam-se melhores resultados de $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ para 6 camadas.

O valor de $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ para 6 camadas apenas se verificou superior comparativamente aos ensaios com 5 camadas no solo “Zona Industrial”. Os valores de $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ nos solos “Ladeiras”, “Solo B” e “Ribeirinha” para 6 camadas foram bastante próximos dos valores para 5 camadas.

Averigua-se que dividindo o solo em mais uma camada, consistindo num ensaio com 6 camadas, são aplicadas mais 30 pressões no solo resultando em mais 157,5 J por camada. Assim a energia de compactação aplicada é de tal forma elevada para estas condições que pode levar o solo a romper por corte ou punçoamento, não se verificando vantagens em usar 6 camadas na compactação com a mola de 40 lb.

Destaca-se ainda que o solo B é um solo pouco elucidativo na medida em que os resultados obtidos para 4 e 5 camadas na mola de 20 lb são bastante próximos, assim como os resultados obtidos para 5 e 6 camadas na mola de 40 lb.

Para concluir o estudo paramétrico efetuado definem-se 4 camadas para a compactação com a mola de 20 lb e 5 camadas para a compactação com a mola de 40 lb.

5.4. Comparação entre ensaios de Proctor e Harvard

Na figura 5.10 comparam-se os resultados para as compactações leve e pesadas para os dois ensaios realizados.

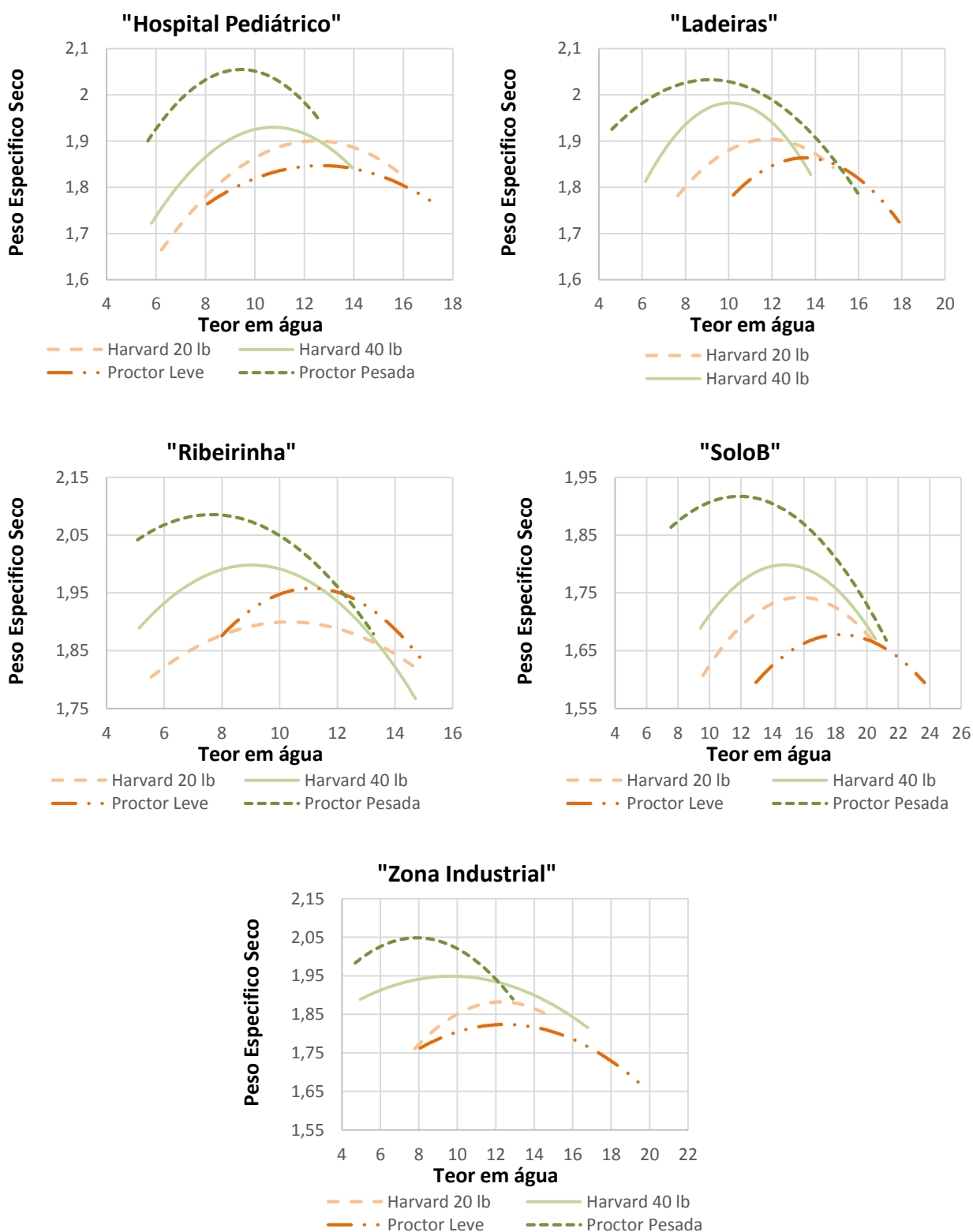


Figura 5. 9 - Curvas de Compactação em Harvard para ambas as molas de 20 e 40 lb e em Proctor leve e pesado.

Os valores de referência resumidos no Quadro 5.16 para a compactação leve e Quadro 5.17 para a compactação pesada.

Quadro 5.13 - Coordenadas do ponto máximo de cada curva de compactação para a mola de 20 lb no ensaio de Harvard e para a compactação leve de Proctor

	Harvard 20 lb		Proctor Leve	
	W _{opt} (%)	γ _{d,máx} (g/cm ³)	W _{opt} (%)	γ _{d,máx} (g/cm ³)
Hospital Pediátrico	12,39	1,896	12,68	1,847
Ladeiras	11,86	1,903	13,56	1,867
Ribeirinha	10,23	1,895	11,11	1,958
Solo B	15,97	1,754	18,29	1,678
Zona Industrial	12,28	1,882	12,61	1,828

Quadro 5.14 - Coordenadas do ponto máximo de cada curva de compactação para a mola de 40 lb no ensaio de Harvard e para a compactação pesada de Proctor

	Harvard 40 lb		Proctor Pesado	
	W _{opt} (%)	γ _{d,máx} (g/cm ³)	W _{opt} (%)	γ _{d,máx} (g/cm ³)
Hospital Pediátrico	10,72	1,928	9,40	2,051
Ladeiras	10,09	1,986	8,99	2,032
Ribeirinha	8,99	1,995	7,62	2,084
Solo B	14,91	1,807	11,78	1,922
Zona Industrial	9,593	1,946	7,88	2,048

No ensaio de Harvard com a mola de 40lb para todos os solos, comparativamente a Proctor pesado, obtém-se de um teor em água ótimo mais elevado para um peso específico seco mais baixo. No caso do ensaio de Harvard com a mola de 20lb, obtém-se, comparativamente à variante de compactação leve de Proctor, para todos os solos, um teor em água ótimo mais baixo para um peso específico seco mais elevado.

O “solo B” destaca-se de todos os outros solos. Em todos os ensaios efetuados com Proctor ou Harvard este foi o que apresentou o teor em água ótimo mais elevado para o peso específico seco mais baixo.

Quanto ao solo “Ribeirinha” em todos os ensaios exceto Harvard 20lb, este foi o solo cujo ponto máximo da curva de compactação foi superior ao ponto máximo dos outros solos. Notando também que em todos os ensaios exceto Harvard 20lb, a curva de compactação deste solo apresentou-se relativamente fechada.

Salienta-se que a diferença entre valores de peso específico seco entre ambos os compactadores, em termos técnicos não é muito significativa. A diferença em percentagem encontra-se ilustrada no quadro 5.15.

Quadro 5. 15 - Diferença em percentagem entre pesos específicos secos

	Harvard 20 lb e Proctor leve	Harvard 40 lb e Proctor Pesado
Hospital Pediátrico	3%	6%
Ladeiras	2%	2%
Ribeirinha	3%	4%
Solo B	4%	6%
Zona Industrial	3%	5%

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusão

A presente dissertação teve como finalidade definir um procedimento de compactação em laboratório com a miniatura de Harvard, intitulado MCH-ISEC/2014 com base nos procedimentos já existentes propostos por Wilson e pelo State of Nevada DMTD e Proctor. Para tal, foi necessário realizar um estudo paramétrico efetuado que se descreve no capítulo 5.2., permitindo definir o número de pressões a introduzir no solo assim como o número de camadas pelas quais se divide o solo a compactar e a mola a utilizar em cada compactação leve ou pesada. O estudo paramétrico realizado teve como referência os dados obtidos previamente no mesmo solo com o ensaio de Proctor.

Estando a metodologia dispersa por vários capítulos da dissertação, opta-se por aqui resumir todo o procedimento:

- 1) Inicia-se com a preparação das amostras. Em primeiro procede-se à secagem em estufa do material desagregado e livre de grumos e matéria orgânica seguindo-se a preparação de 6 a 8 recipientes com amostras de 150g de solo às quais devem ser acrescentadas diferentes percentagens de água. As amostras devem repousar seladas numa câmara de climatização durante um período que permita que ocorram mecanismos de interação entre as moléculas de água e as partículas do solo.
- 2) O equipamento deve ser adequadamente preparado nomeadamente a instalação do molde no suporte com o papel de filtro e a montagem do martelo com a mola pretendida. Todos os acessórios utilizados devem estar devidamente limpos e sem vestígios de outros solos ou resíduos.
- 3) Cada amostra preparada deve ser despejada num tabuleiro e deverá ser dividida em porções equivalentes ao número de camadas pretendido, 4 no caso de compactação com a mola de 20 lb e 5 no caso da compactação com a mola de 40 lb.
- 4) A compactação procede-se com o cuidado de manter a verticalidade do martelo por forma a garantir a correta aplicação da carga, e deve ser efetuada segundo a sequência predita por Wilson (1970), ilustrada na Figura 4.11. Em cada camada devem ser introduzidas 30 pressões em 45 segundos.
- 5) O molde deve ser separado da alonga através do aparelho designado para o efeito e deve ser retirado o anel da base rasando-se o topo e a base da amostra por forma a extrair o material excedente.
- 6) O molde e o solo compactado devem ser pesados prosseguindo-se a extração da amostra do seu interior através do aparelho destinado a esse efeito. Pode acontecer que a força imprimida no solo durante a compactação seja de forma tal que não seja possível remover a amostra intacta do molde. Nesse caso o solo deve ser removido através de uma espátula ou equivalente.
- 7) A amostra deve ser separada em frações aproveitando-se frações de aproximadamente 30g para secar em estufa e pesar posteriormente para que sejam numa fase final promovidos os cálculos necessários à obtenção de resultados.

Da análise dos resultados constatou-se que o ponto máximo das curvas de compactação de todos os solos para a mola de 40lb é caracterizado por W_{opt} inferior e por um $\gamma_{d,máx}$ superior relativamente às coordenadas do ponto máximo das curvas de compactação com a mola de 20lb. Este resultado coaduna-se com os conceitos teóricos associados ao efeito do aumento de energia de compactação.

Tanto para a mola de 20lb como para a mola de 40lb o solo que apresenta uma curva de compactação com o ponto máximo mais elevado é “Ribeirinha”. Este solo sendo fracamente plástico, com o índice de plasticidade mais baixo de todos, necessita de um menor teor em água para atingir um peso específico seco mais elevado.

Em contrapartida, tanto para a mola de 20lb como para a mola de 40lb o solo que apresenta uma curva de compactação com o ponto máximo mais baixo é “Solo B”. Este solo sendo fortemente plástico, com o índice de plasticidade mais elevado de todos, necessita de um maior teor em água para atingir um peso específico seco mais elevado.

Ambos os solos anteriores apresentam uma curva granulométrica mal graduada com uma percentagem de partículas passadas no peneiro 200 superior a 50% e constituem ambos argilas, argila magra no caso do “solo B” e uma argila arenosa no caso do solo “Ribeirinha”.

No ensaio de Harvard com a mola de 40lb para todos os solos, comparativamente a Proctor pesado, obtém-se um teor em água ótimo mais elevado para um peso específico seco mais baixo. No caso do ensaio de Harvard com a mola de 20lb, obtém-se, comparativamente à variante de compactação leve de Proctor, para todos os solos, um teor em água ótimo mais baixo para um peso específico seco mais elevado.

O “solo B” destaca-se de todos os outros solos. Em todos os ensaios efetuados com Proctor ou Harvard este foi o que apresentou o teor em água ótimo mais elevado para o peso específico seco mais baixo.

Em termos de energia ambos os ensaios devem ser comparados em termos de energia por cm^3 . Apesar de Proctor imprimir mais energia por impacto a quantidade de solo contida no molde é muito superior à de Harvard. Consequentemente, em Proctor leve obtém-se uma energia teórica de $0,59\text{J}/\text{cm}^3$ contra Harvard com 30 pressões em 4 camadas com a mola de 20lb, de $4,64\text{J}/\text{cm}^3$. Os resultados em termos de peso específico seco obtidos com Harvard 20lb são mais favoráveis que os que foram obtidos em Proctor leve.

Em Proctor pesado obtém-se uma energia teórica de $2,7\text{J}/\text{cm}^3$ contra Harvard com 30 pressões em 5 camadas com a mola de 40lb, de $12,63\text{J}/\text{cm}^3$. Todavia, apesar de imprimir mais energia por cm^3 , os resultados em termos de peso específico seco obtidos com Harvard 40lb não são melhores que os de Proctor pesado, sendo necessários teores em água muito mais elevados para obter pesos específicos secos inferiores.

Quanto ao solo “Ribeirinha” em todos os ensaios exceto Harvard 20lb, este foi o solo cujo ponto máximo da curva de compactação foi superior ao ponto máximo dos outros solos. Notando também que em todos os ensaios exceto Harvard 20lb, a curva de compactação deste solo apresentou-se relativamente fechada.

A diferença entre valores de peso específico seco entre ambos os compactadores, em termos técnicos não é muito significativa, o que é um resultado favorável para este estudo uma vez eu

se pretendia definir uma técnica de compactação em Harvard que permitesse obter valores aproximados dos que correntemente se obtém em Proctor.

Destaca-se que este equipamento pode vir a trazer vantagens na compactação em campo considerando as suas reduzidas dimensões, e a eficiência na realização de ensaios não só em termos de tempo como de material disponível. Em contrapartida é necessário manter coerência nos ensaios devendo ser respeitados o procedimento estabelecido, o modo de operação do martelo, e o modo de aplicação de pressões.

6.2. Trabalhos futuros

O estudo da Miniatura de Harvard como equipamento de compactação de solos coesivos requiere ainda um maior desenvolvimento, existindo um longo caminho a percorrer. Nesta dissertação trabalhou-se no sentido de encontrar um procedimento que pudesse equiparar os métodos correntemente utilizados em laboratório e que desta forma tornassem o equipamento viável para ensaios em laboratório. Seria interessante explorar a aplicação deste equipamento em campo. Wilson (1950) averiguou que, comparativamente a outros métodos de compactação, nomeadamente Proctor, entre outros, a miniatura de Harvard reproduzia com maior precisão a ação do cilindro pés-de-carneiro. Mas desde então, não são conhecidos quaisquer estudos sobre este tema.

Como trabalhos futuros propõe-se o seguinte:

- o desenvolvimento de um procedimento de extração de amostras “in situ” que possibilite o ensaio imediato das amostras em campo através do compactador de Harvard;
- alargar a base de dados de solos ensaiados por forma a corroborar o procedimento proposto (MCH-ISEC/2014) e aplicado aos cinco solos descritos;
- Avaliação de parâmetros geotécnicos de amostras compactadas com o Harvard com recurso a ensaios laboratoriais correntes.

Será ainda pertinente a comparação dos ensaios de compactação com a Miniatura de Harvard em laboratório e “in situ” “através da determinação do Grau de Compactação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Caputo, H. P. (1996). *Mecânica dos solos e suas aplicações*. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- Correia, A. R., & Almeida da Benta. (2007). *Aspectos do Comportamento Geomecânico da Formação “Argilas de Aveiro”*. Aveiro.
- Cristelo, N. (2001). *Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal*. Minho.
- Cruz, F. (2009). *Apontamentos Teóricos - Introdução à Geotecnia*. ISEC-DEC.
- Das, B. M. (1941). *Principles of Geotechnical Engineering*. Austrália [etc.] : Cengage Learning, cop. 2006.
- Fernandes, M. d. (2006). *Mecânica dos Solos - Introdução à Engenharia Geotécnica, Volume 2*. Porto: FEUP edições.
- Humboldt. (2003). *H-4165 Instruction Manual: Harvard Miniature Compaction Apparatus*. Norridge, Illinois: Humboldt and Authorized Dealers Worldwide.
- MacIver, B. N., & Donaghe, R. T. (1971). *Evaluation of Soil Mechanics Laboratory Equipment. Report 12. Modified Berkeley pneumatic tamper for compacting test specimens of cohesive soils*. Mississippi: Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg.
- Melo, F. G., & Ferreira, H. N. (1981). Controle da construção de obras de terra. *Seminário 249* (pp. 9-12). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Moreira, C. M. (2008). *Noções Gerais sobre Compactação*. Coimbra: ISEC-DEC.
- Nussenzveig, H. M. (1997). *Curso de Física Básica*. São Paulo: Editora Edgard Blücher, Ltda. Obtido de w3.ualg.pt/~arodrig/Documentos/FísicaI_11_12/13_Oscilação.ppt
- Rodrigues, A. M. (Junho de 2014). <https://w3.ualg.pt/>. Obtido de w3.ualg.pt/~arodrig/Documentos/FísicaI_11_12/13_Oscilação.ppt
- Rogers, J. D. (8 de Agosto de 2014). <http://web.mst.edu/>. Obtido de http://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge441/online_lectures/compaction/GE441-Lecture2-1.pdf
- Vargas, M. (1977). *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil, Ltda.
- Wilson, S. D. (1950). Small soil compaction apparatus duplicated field results closely. *Engineering News-Record*, 34-36.
- Wilson, S. D. (1970). *Suggested Method of Test for Moisture-Density relations of soils using Harvard Compaction Apparatus*. Special procedures for testing soil and rock for engineering purpose. ASTM STP 479.
- D-2487 – 06, Documentation – Standard Practice for Classification of soils for engineering purposes: Unified soil Classification System, ASTM
- E 145, 1966, Documentação normativa – Especificação do LNEC para solos: Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação, LNEC.
- E 196, 1966, Documentação normativa – Especificação do LNEC para solos: Análise Granulométrica, LNEC.

E 197, 1966, Documentação normativa – Especificação do LNEC para solos: Ensaio de Compactação, LNEC.

E 240, 1970, Documentação normativa – Especificação do LNEC para solos: Classificação para fins rodoviários, LNEC.

NP-83, 1965, Documentação – Norma Portuguesa: Determinação da densidade das partículas, LNEC.

NP-84, 1965, Documentação – Norma Portuguesa: Determinação do teor em água, LNEC.

NP-143, 1969, Documentação – Norma Portuguesa: Determinação dos Limites de Consistência, LNEC.

Test Method Nev. T101G, 2008, Documentação - Method of test for maximum density and relative compaction of soils using the Harvard miniature compaction device, State of Nevada Department of Transportation: Materials Division.