



Mestrado em Engenharia Civil

Estudo comparativo de diversas técnicas de compactação laboratorial e suas implicações

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

Autora

Joana Pinheiro Silva

Orientador

Prof. Doutor Luis Manuel Araújo Santos

Professor do Departamento de Engenharia Civil
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, Dezembro, 2016

AGRADECIMENTOS

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

Em primeiro, e acima de tudo, expresso o meu agradecimento a toda a minha família, especialmente aos meus pais, que contribuíram de todas as formas possíveis para que eu conseguisse trilhar da melhor maneira o meu percurso académico.

Estou de uma forma distinta, agradecida ao Professor Doutor Luis Araújo Santos, Assistente do Departamento de Engenharia Civil (DEC) do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC), por toda a orientação científica deste trabalho, por todo o conhecimento transmitido bem como todo o empenho e dedicação para a realização deste trabalho. Manifesto também um agradecimento especial ao Engenheiro Técnico Carlos Renato, Técnico do DEC-ISEC, pela ajuda indispensável prestada na realização de grande parte dos trabalhos experimentais.

Um especial agradecimento ao meu primo Hélder que com o seu entusiasmo pela Engenharia Civil cativou-me e incentivou-me ainda mais a seguir esta área, sendo para mim um Exemplo a seguir.

Ao meu irmão João Filipe agradeço o seu apoio incondicional.

A todos os meus colegas e amigos que sempre me apoiaram, salientando o Julien e a Andrea que foram dois pilares essenciais para mim em todo o meu percurso.

Ao técnico António Amaral pela sua disponibilidade em ajudar no que podia, mas principalmente pela sua boa disposição.

À minha colega Mariana com a qual dividi o laboratório durante a realização dos ensaios, partilhando conhecimento.

Agradeço ao laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, pela cedência de material indispensável para a realização desta dissertação.

Por fim, dedico esta tesa ao meu sobrinho João Pedro, que embora criança foi um dos meus grandes estímulos para realizar um bom trabalho, de modo a querer ser para ele um exemplo de persistência, trabalho e dedicação.

RESUMO

A compactação uma das formas de melhoramento das propriedades dos solos, sendo de extrema importância estudar previamente as propriedades do solo que se pretende caracterizar para posteriormente recorrer-se ao tipo de compactação mais eficaz. Só assim é possível garantir a obtenção do máximo rendimento do solo. As características avaliadas são o teor em água e o peso específico, parâmetros obtidos através de ensaios de compactação, sendo o mais utilizado o ensaio de Proctor. No presente trabalho, são realizados outros tipos de ensaios de modo a relacioná-los com o tipo de solo em estudo.

Para além dos ensaios de compactação, qualquer obra de terra (aterros, escavações, etc.) necessita que se conheçam os parâmetros de resistência do solo. Surgem, deste modo, os ensaios de caracterização mecânica que estimam qual a resistência do solo mediante um determinado esforço aplicado. A análise destes valores consoante o tipo de compactação realizada previamente revela qual é a capacidade resistente do solo dependendo do tipo de compactação efetuada. Deste modo, conhece-se qual o tipo de compactação que se deve aplicar para obter a resistência máxima do solo.

A realização de ensaios laboratoriais requer tempo e pode ser oneroso se não existir um plano de ensaios devidamente implementado. Como primeira aproximação, são usualmente utilizadas relações empíricas que pode fornecer informações semelhantes aos ensaios laboratoriais, complementando assim os estudos e fornecendo algum grau de confiança aos inúmeros resultados laboratoriais.

Na presente dissertação apresentam-se também estudos realizados com o objetivo de complementar investigações anteriormente promovidas, e assim desenvolver procedimentos adequados não só em trabalhos laboratoriais mas também de campo.

Palavras-chave: Caracterização laboratorial; Compactação; Triaxial; CBR

ABSTRACT

Compaction is one of the many techniques to improving soil properties. In order to achieve the most effective type of compaction, it is highly important to previously study the characteristics of the soil it is intended to be studied. Only then it will be possible to obtain the best improvement of the soil. The evaluated characteristics in compaction test are the water content and specific weight. The most commonly laboratory test used is the Proctor test. However it is intended to perform other types of tests in order to relate them to type of soil present.

In addition to compaction test, any earth structures (landfills, excavations, etc.) requires the knowledge of soil resistance properties. For this, a wide range of strain-stress-strength characterization test is available. The analysis of the resistance properties according the type of compaction previously carried out, will reveal the type of compaction most suitable for each soil. Thus, the maximum resistance of the soil will be obtained.

Conducting laboratory test is time consuming and can be costly, namely if no test plan is previously defined. Empirical relationships are often used as a first approximation to evaluated soil properties. They also can complement laboratory tests, providing a simple and efficient way to discard erroneous laboratory results.

In the present dissertation, several studies were carried out in order to compare and contrast different compaction techniques. As these studies also complete previously finished investigations, more adequate procedures, not only for laboratory but also for field work, can be developed.

Keywords: Laboratory characterization; Compaction; Triaxial; CBR

ÍNDICE

1. Introdução.....	17
1.1. Enquadramento	17
1.2. Organização do trabalho	18
2. Revisão bibliográfica.....	19
2.1. Métodos convencionais de estabilização de solos	19
2.1.1. Técnica de melhoria por compactação	19
2.1.2. Compactação de solos	22
2.1.2.1. Definição.....	22
2.1.2.2. Fatores que influenciam a compactação	22
2.2. Caracterização do comportamento mecânico dos solos.....	25
2.2.1. Comportamento a curto e a longo prazo.....	25
2.2.1.1. Parâmetros de resistência.....	25
2.2.2. Quantificação da resistência	26
2.2.2.1. CBR	26
2.2.2.2. q último, q_u	26
2.2.3. Módulo de deformabilidade, E	26
2.3. Formulações semi-empíricas para estimativa da resistência do solo.....	27
2.4. Considerações finais	28
3. Materiais, equipamentos e técnicas de investigação	29
3.1. Materiais	29
3.2. Ensaio de identificação de solos.....	30
3.2.1. Análise granulométrica (E196-1966)	30
3.2.2. Limites de Consistência.....	31
3.2.3. Classificação de Solos	31
3.3. Ensaio laboratoriais de Compactação.....	32
3.3.1. Ensaio de Proctor.....	33
3.3.2. Ensaio de Harvard usando o Procedimento MCH-ISEC/2014.....	34
3.3.3. Comparação da energia de compactação entre Proctor e Harvard	36
3.4. Ensaio de Compactação por Vibração	36
3.4.1. Equipamento utilizado.....	38
3.4.2. Montagem do equipamento	38
3.4.3. Procedimento	39
3.4.4. Cuidados a ter	42
3.5. Ensaio do Índice de Suporte Califórnia (CBR)	42
3.5.1. Equipamento utilizado.....	42

3.5.2.	Procedimento	43
3.5.3.	Curva força-penetração	45
3.5.4.	Conclusão.....	45
3.6.	Ensaio de Compressão Simples não Confinado (UCS).....	46
3.6.1.	Equipamento de Ensaio.....	46
3.6.2.	Calibração dos Instrumentos de Leitura.....	47
3.6.2.1.	Célula de carga	47
3.6.2.2.	Defletómetro.....	49
3.6.3.	Procedimento	50
3.6.3.1.	Preparação do provete	50
3.6.3.2.	Compressão na prensa triaxial.....	50
3.6.4.	Tratamento de resultados	51
4.	Resultados dos Ensaios de compactação	53
4.1.	Ensaios de Proctor	53
4.1.1.	Resultados dos ensaios.....	53
4.1.2.	Comentários acerca dos ensaios de compactação de Proctor	54
4.2.	Ensaios de Harvard.....	55
4.2.1.	Resultados dos ensaios.....	55
4.2.2.	Comentários acerca dos ensaios de compactação de Harvard	57
4.3.	Ensaios de compactação por vibração	58
4.3.1.	Resultados dos ensaios.....	58
4.3.2.	Comentários aos resultados obtidos.....	58
4.4.	Comparação entre os vários métodos de compactação	60
4.4.1.	Comparação entre a compactação de Proctor e Harvard	60
4.4.2.	Comparação entre a compactação de Proctor e a compactação por Vibração...	61
4.4.3.	Comparação entre a compactação por Harvard e a compactação por Vibração	62
4.4.4.	Comparação entre os 3 métodos de compactação analisados	64
4.4.5.	Efeito da energia de compactação.....	64
4.4.5.1.	Peso volúmico seco máximo	64
4.4.5.2.	Teor em água ótimo.....	65
4.4.6.	Efeito do teor de finos	65
4.5.	Conclusões.....	66
5.	Resultados dos Ensaios laboratoriais de caracterização do comportamento mecânico ...	67
5.1.	Ensaio do Índice de Suporte Califórnia (CBR).....	67
5.1.1.	Resultados dos ensaios.....	67
5.1.1.1.	Determinação do CBR imediato.....	67
5.1.1.2.	Determinação do CBR.....	68
5.1.2.	Análise e comentários aos resultados dos ensaios de CBR	69
5.2.	Ensaio de compressão simples não confinada (UCS)	71

5.2.1.	Resultados dos ensaios	71
5.2.1.1.	Compactação de Proctor	72
5.2.1.2.	Compactação de Harvard	74
5.2.1.3.	Compactação por Vibração.....	77
5.2.2.	Análise e comentários aos resultados dos ensaios UCS	80
5.2.2.1.	Energia de compactação	80
5.2.2.2.	Influência da granulometria	82
5.3.	Correlações entre ensaios de compactação e resistência	84
5.3.1.	Estimativa do CBR	84
5.3.2.	Estimativa do q_u	84
5.3.3.	Relação q_u e CBR	86
5.4.	Conclusões	87
6.	Conclusões e Propostas de Investigação Futura	89
6.1.	Conclusão.....	89
6.2.	Trabalhos futuros	90
7.	Referências bibliográficas	91
8.	Anexos.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 - Modos de compactação	20
Figura 2-2 - Curva de compactação de um solo argiloso (Moreira, 2008)	23
Figura 2-3 - Curvas de saturação de um solo argiloso (Moreira, 2008)	23
Figura 2-4 - Curvas de compactação de um solo com energias diferentes	24
Figura 2-5 - Curvas de compactação de solo com percentagens de grossos diferentes (Moreira, 2008)	25
Figura 3-1 - Localização dos solos a) Hospital Pediátrico, b) Zona Industrial, c) Ladeiras, d) Remessa	29
Figura 3-2 - Curva granulométrica do solo “Remessa”	30
Figura 3-3 - Comparação das curvas de compactação obtidas por vibração com a curva de compactação do ensaio Proctor normal (Caldeira & Brito (2007))	37
Figura 3-4 - Equipamento utilizado na compactação por vibração: a) molde cilíndrico; b) ponteira com placa acoplada; c) martelo elétrico	38
Figura 3-5 - Montagem do equipamento	39
Figura 3-6 - Montagem do martelo usando o sistema do laboratório de Pavimentos Rodoviários do ISEC	39
Figura 3-7 - Amostras seladas	40
Figura 3-8 – Primeira camada compactada por vibração	40
Figura 3-9 - Molde compactado por vibração rasado	41
Figura 3-10 - Cápsulas com amostras de solo compactado por vibração	42
Figura 3-11 - Ensaio CBR: – a) fase de expansão; b) ensaio de penetração	44
Figura 3-12 - Correção curva força-penetração (http://www.ebanataw.com.br/terrapleno/ensaiocbr.htm , 25/11/2016)	45
Figura 3-13 – Prensa triaxial do modelo Trittech 50 kN	47
Figura 3-14 – célula de carga eletrónica	48
Figura 3-15 – Gráfico de calibração da célula de carga	48
Figura 3-16 Micrómetro	49
Figura 3-17 - Gráfico de calibração do micrómetro	49
Figura 3-18 - Preparação do provete: a) amostra após compactação; b) corte da amostra com serra manual; c) amostra no torno mecânico; d) amostra com as dimensões pretendidas	50
Figura 3-19 - Provete na prensa triaxial: a) provete antes do ensaio; b) provete depois do ensaio	51

Figura 3-20 – Módulo de deformabilidade (http://pt.slideshare.net/rogeriojms/mecsolos , 8/12/2016)	52
Figura 4-1 - Resultados dos ensaios de compactação para o solo Remessa: a) compactação leve, b) compactação pesada	53
Figura 4-2 - Resultados dos ensaios de compactação para o solo Remessa: a) Compactação com mola de 20lb, b) Compactação com mola de 40lb	55
Figura 4-3 Perda de material devido ao elevado tempo de vibração	59
Figura 5-1 – Curvas referentes ao ensaio de CBR imediato para os solos: a) Hospital Pediátrico; b) Ladeiras; c) Zona Industrial; d) Remessa	67
Figura 5-2 - Curvas referentes ao ensaio de CBR para os solos: a) Hospital Pediátrico; b) Ladeiras; c) Zona Industrial; d) Remessa	68
Figura 5-3 - Curvas de tensão-deformação das amostras preparadas por compactação de Proctor Leve: a) Hospital Pediátrico; b) Ladeiras; c) Zona Industrial; d) Remessa	72
Figura 5-4 - Curvas de tensão-deformação das amostras preparadas por compactação de Proctor Pesado: a) Hospital Pediátrico; b) Ladeiras; c) Zona Industrial; d) Remessa	73
Figura 5-5 - Curvas de tensão-deformação das amostras preparadas por compactação de Harvard com mola de 20lb: a) Hospital Pediátrico; b) Ladeiras; c) Zona Industrial; d) Remessa	75
Figura 5-6 - Curvas de tensão-deformação das amostras preparadas por compactação de Harvard com mola de 40lb: a) Hospital Pediátrico; b) Ladeiras; c) Zona Industrial; d) Remessa	76
Figura 5-7 - Curvas de tensão-deformação das amostras preparadas por compactação por vibração Leve: a) Hospital Pediátrico; b) Ladeiras; c) Zona Industrial; d) Remessa	77
Figura 5-8 - Curvas de tensão-deformação das amostras preparadas por compactação por vibração Pesada: a) Hospital Pediátrico; b) Ladeiras; c) Zona Industrial; d) Remessa	79
Figura 5-9 - Gráfico com a relação entre q_u obtido em laboratório com q_u obtido através de correlação de valores: a) Proctor; b) Harvard e c) Vibração	86
Figura 5-10 - Gráfico com a relação entre q_u obtido em laboratório com q_u obtido através de correlação de valores resultantes do ensaio de CBR: a) Proctor; b) Harvard e c) Vibração	87

NDICE DE QUADROS

Quadro 3-1 - Localização dos solos	29
Quadro 3-2 - Análise granulométrica	31
Quadro 3-3 - Limites de consistência	31
Quadro 3-4 - Densidade das partículas	32
Quadro 3-5 - Classificação dos solos	32
Quadro 3-6 - Ensaio de Proctor (E197-1966 LNEC)	33
Quadro 3-7 - Ensaio de Harvard – Procedimento MCH-ISEC/2014	35
Quadro 3-8 - Cálculo da energia de compactação (Lopes, 2014)	36
Quadro 3-9 - Energia de compactação em Proctor e Harvard (Lopes, 2014)	36
Quadro 3-10 - Ensaio de compactação por vibração	38
Quadro 4-1 - Valores de teor em água ótimo e peso específico seco máximo do solo Remessa obtidos na compactação leve e pesada de Proctor	54
Quadro 4-2 - Coeficiente de determinação das curvas de compactação	54
Quadro 4-3 - Valores de teor em água ótimo e peso específico seco máximo do solo Remessa obtidos na compactação de Harvard	56
Quadro 4-4 - Coeficiente de determinação das curvas de compactação	56
Quadro 4-5 - Resultados da compactação usando a mola de 20lb	56
Quadro 4-6 - Resultados da compactação usando a mola de 40lb	57
Quadro 4-7 - Resultados para a compactação por vibração	58
Quadro 4-8 - Diferenças de temperatura durante a compactação por vibração	59
Quadro 4-9 - Comparação do teor em água ótimo entre a compactação de Proctor e a compactação de Harvard	60
Quadro 4-10 - Comparação do peso volúmico seco entre a compactação de Proctor e a compactação de Harvard	61
Quadro 4-11 - Comparação do teor em água ótimo entre a compactação por vibração e a compactação de Proctor	61
Quadro 4-12 - Comparação do peso específico seco entre a compactação por vibração e a compactação de Proctor	62
Quadro 4-13 - Comparação do teor em água ótimo entre a compactação por vibração e a compactação por Harvard	63
Quadro 4-14 - Comparação do peso específico seco entre a compactação por vibração e a compactação por Harvard	63
Quadro 4-15 - Quadro comparativo entre os 3 métodos de compactação analisados	64
Quadro 4-16 – Seleção de equipamentos dependendo do tipo de solo	66

Quadro 5-1 – CBR imediato	68
Quadro 5-2 – CBR	69
Quadro 5-3 – Comparação dos valores de CBR e CBR _i	69
Quadro 5-4 – Valores de CBR característicos segundo Sabogal (2009)	70
Quadro 5-5 – Correlação do CBR obtido com o valor característico do CBR	71
Quadro 5-6 – Resistências dos solos para a compactação de Proctor Leve	72
Quadro 5-7 – Módulo de deformabilidade na compactação leve de Proctor	73
Quadro 5-8 - Resistências dos solos para a compactação de Proctor Pesado	74
Quadro 5-9 - Módulo de deformabilidade na compactação pesada de Proctor	74
Quadro 5-10 - Resistências dos solos para a compactação de Harvard com 20lb	75
Quadro 5-11 - Módulo de deformabilidade na compactação de Harvard com mola de 20lb	75
Quadro 5-12 - Resistências dos solos para a compactação de Harvard com 40lb	76
Quadro 5-13 - Módulo de deformabilidade na compactação de Harvard com mola de 40lb	77
Quadro 5-14 - Resistências dos solos para a compactação por vibração Leve	78
Quadro 5-15 - Módulo de deformabilidade na compactação leve por vibração	78
Quadro 5-16 - Resistências dos solos para a compactação por vibração Pesada	79
Quadro 5-17 - Módulo de deformabilidade na compactação pesada por vibração	79
Quadro 5-18 – Comparação entre os ensaios de Proctor	80
Quadro 5-19 - Comparação entre os ensaios de Harvard	81
Quadro 5-20 - Comparação entre os ensaios de Vibração	81
Quadro 5-21 – Comparação dos ensaios de compactação leve	82
Quadro 5-22 - Comparação dos ensaios de compactação pesada	83
Quadro 5-23 – Estimativa do CBR (%) pela Equação 2-1	84
Quadro 5-24 – Estimativa do q_u (kPa) pela Equação 2-2	85
Quadro 5-25 - q_u (kPa) obtido através do ensaio de CBR	86

SIMBOLOGIA E ACRÓNIMOS

CBR – índice de suporte Califórnia

CBR_i – índice de suporte Califórnia realizado imediatamente após compactação

E₅₀ – módulo de deformabilidade correspondente a 50% da resistência de pico

IP – índice de plasticidade

LL – limite de liquidez

LP – limite de plasticidade

q_u – resistência à compressão não confinada

γ – peso específico

γ_d – peso volúmico seco

$\gamma_{dmáx}$ – peso volúmico seco máximo

ω – teor em água

ω_{opt} – teor em água ótimo

δv – deslocamento vertical

ε – extensão

ε_{ax} – extensão axial

ρ – densidade

ASTM - American Society for Testing and Materials

BS – British Standard

E – Especificação

LNEC – laboratório Nacional da Engenharia Civil

MACOPAV – Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional

MCH-ISEC/2014 – Procedimento método de compactação de Harvard

NP – Norma Portuguesa

UCS – ensaio de compressão simples com amostra não confinada

1. Introdução

A compactação de solos é, provavelmente, a técnica de melhoramento de maciços terrosos mais utilizada na engenharia geotécnica e rodoviária. Com vista a avaliar, entre outros aspetos, a influência do tipo de compactação em vários tipos de solos, nomeadamente em termos de comportamento mecânico, propõe-se a presente dissertação de mestrado realizada no âmbito do Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Construção Urbana e cujos enquadramento e organização se descrevem seguidamente.

1.1. Enquadramento

Os ensaios laboratoriais são de extrema importância na simulação, em condições controladas, do que se passa realmente *in situ*. Para tal devem-se realizar diversos ensaios para se prever o que acontece em obra e assim evitar possíveis acidentes ou incidentes bem como analisar todas as características dos solos. Com os dados recolhidos em laboratório é possível, deste modo, um melhor planeamento da obra, aumentando assim as hipóteses de sucesso da obra. Para cada tipo de solo podem ser necessárias diferentes abordagens no que toca a ensaios laboratoriais, pois cada solo possui determinadas características próprias, devendo fazer-se estudos consoante estas mesmas características.

Sendo os solos materiais trifásicos, sendo os vazios preenchidos por ar ou água, torna-se necessário proceder a um melhoramento das suas propriedades para assim obter o máximo desempenho possível. O processo que se utiliza para melhorar o seu desempenho é a compactação, podendo esta ser natural ou artificial. A natural surge de forma espontânea através do peso próprio dos materiais e da atuação de diversos agentes (atmosféricos, físicos, químicos e biológicos). No entanto este processo é lento, tendo sido necessário desenvolver soluções técnicas que permitissem acelerar este processo. Entre outras soluções surgiu, a compactação, apresentando-se como um dos processos mais eficiente. Esta técnica provou que, quando bem executada, permite aumentar a resistência ao corte e diminuir quer a deformabilidade quer a permeabilidade do solo, uma vez que este é um processo que tem como base a diminuição do volume de vazios. Existem diversos ensaios laboratoriais que tem este princípio, sendo abordados três ao longo desta dissertação: o ensaio de Proctor, o ensaio de Harvard e o ensaio de compactação por vibração.

Os ensaios laboratoriais de caracterização mecânica dos solos constituem uma das componentes de grande relevância na engenharia geotécnica, pois estes estudos caracterizam o comportamento tensão-deformação dos solos. Os ensaios realizados visam não só a caracterização física e mecânica dos materiais, como também por vezes a caracterização hidráulica. Nesta dissertação, para além dos ensaios anteriormente referidos, são também realizados ensaios de resistência, nomeadamente, o ensaio de índice de suporte Califórnia (CBR) e o ensaio de compressão simples com amostra não confinada (UCS).

1.2. Organização do trabalho

A dissertação é composta por seis capítulos cujo conteúdo é aqui sintetizado.

No Capítulo 1 é feita uma breve introdução, no qual, após um enquadramento do trabalho, é feita uma sinopse dos vários capítulos que constituem este trabalho.

No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica onde são abordados os temas de forma científica e tecnológica. É introduzida a compactação dos solos como técnica de melhoramento de solos bem como as técnicas utilizadas para esse melhoramento, sendo também descritos os fatores que a influenciam. Descreve-se também a caracterização do comportamento mecânico, sendo tecidas breves considerações sobre o comportamento do solo a curto e a longo prazo bem como a quantificação da sua resistência.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais que se vão estudar ao longo de toda a dissertação, que, numa fase inicial, são submetidos a ensaios de identificação de solos. É neste capítulo que se faz a exposição dos ensaios realizados. Isto é, apresentam-se e descrevem-se os equipamentos laboratoriais de compactação, nomeadamente o ensaio de Proctor, o ensaio de Harvard e o ensaio de compactação por vibração, bem como os respetivos procedimentos de ensaio. Por ser menos usual e por ser o primeiro trabalho realizado no ISEC com este equipamento, o ensaio de compactação por vibração é descrito com um maior grau de pormenor do que os restantes dois, propondo-se uma metodologia. Neste capítulo apresentam-se também os ensaios de comportamento mecânico dos solos, nomeadamente o ensaio de índice de suporte Califórnia (CBR) e o ensaio de compressão simples não confinado (UCS).

No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios de compactação em termos de teor em água ótimo e peso volúmico seco máximo, pelos ensaios de Proctor, de Harvard e de compactação por vibração. Aquando apresentação dos resultados são tecidos diversos comentários acerca dos resultados obtidos nos diversos ensaios, sendo realizada, no final do capítulo uma comparação entre os resultados obtidos nos ensaios de compactação efetuados neste trabalho de investigação. É também efetuada uma comparação com os resultados obtidos e publicados por Lopes (2014) que, entre outras conclusões, propõe um procedimento de ensaio para o ensaio de compactação de Harvard.

O Capítulo 0 descreve os resultados dos ensaios laboratoriais de caracterização do comportamento mecânico dos solos. Numa primeira secção expõem-se e discutem-se os resultados obtidos nos ensaios de CBR, tendo-se determinado o CBR_i e o CBR. Numa segunda secção, são apresentados os resultados do ensaio UCS, cujas amostras foram preparadas usando os três métodos de compactação referidos anteriormente. Esta descrição é, logicamente acompanhada de uma análise aos resultados alcançados.

O último capítulo desta dissertação, o Capítulo 0 é dedicado às considerações finais, onde se resumem os principais resultados e conclusões obtidos ao longo desta dissertação. São igualmente sugeridos trabalhos futuros com base no tema desta dissertação que possam complementar o trabalho aqui desenvolvido.

2. Revisão bibliográfica

Ao longo deste capítulo irão ser abordados aspetos teóricos bem com o estado da arte referentes à temática da compactação de solos. No início do capítulo são apresentados os métodos convencionais de estabilização, seguidamente realçam-se os conceitos fundamentais da compactação de solos e finaliza-se com o capítulo com a abordagem às principais características do comportamento mecânico dos solos.

2.1. Métodos convencionais de estabilização de solos

Os métodos de estabilização de solos geralmente são agrupados em três grupos de métodos de estabilização: i) mecânica; ii) física e iii) química.

A estabilização mecânica é o método mais utilizado em obras de pavimentação rodoviária. Este método consiste num conjunto de operações mecânicas que conferem ao solo estabilidade quando solicitado em pavimentos de estradas. As operações mecânicas são aquelas que modificam o arranjo das partículas do solo, ou a sua granulometria. O mecanismo mais popular neste método de estabilização é a compactação, técnica essa que será desenvolvida na secção 2.1.2 (Cristelo, 2001).

Procede-se à estabilização física quando se quer alterar as propriedades do solo, alterando a granulometria do solo. Existem algumas técnicas de estabilização física do solo, tais como a correção granulométrica ou a adição de fibras (metálicas, minerais, sintéticas ou vegetais) (Carvalho, 2011).

Na estabilização química podem ser usados vários tipos de aditivos químicos, onde as partículas do solo são aglutinadas através de reações químicas. Por norma, a estabilização química utilizada em obras de pavimentação rodoviária recorre geralmente ao cimento, à cal e ao betume (Cristelo, 2001).

2.1.1. Técnica de melhoramento por compactação

No campo, os princípios que controlam a compactação dos solos são os mesmos discutidos em ensaios laboratoriais. Tal como se ilustra na Figura 2-1, a energia de compactação, pode ser aplicada de três modos distintos: i) pressão; ii) impacto ou iii) vibração. Usualmente, esta última é aplicada em combinação com uma das outras duas, uma vez que isoladamente não seria muito eficiente (Moreira, 2008). Devido à heterogeneidade do solo estas combinações revelam uma eficácia muito maior na diminuição dos vazios do solo, uma vez que os solos não são compostos só por argila ou por areia, mas sim são uma mistura de várias frações. Conclui-se assim, que teoricamente a argila arenosa será mais afetada por compactação por pressão ou por impacto na sua componente argilosa, mas já a componente arenosa será mais afetada pela compactação por vibração (Moreira, 2008).

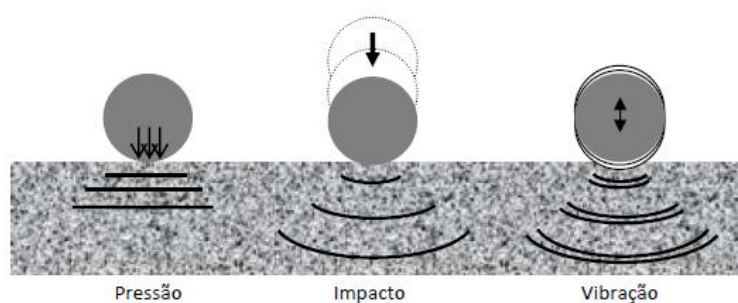


Figura 2-1 - Modos de compactação

O esforço de compactação pode ser aplicado de diferentes formas, tais como estática, dinâmica e vibratória. A força estática deve-se somente ao peso próprio da máquina que aplica pressões sobre o solo de modo a comprimir as suas partículas. Já a força vibratória usa por norma um mecanismo motorizado para criar uma força descendente como acréscimo ao peso estático da máquina. Este mecanismo de compactação consiste na produção rápida de pancadas na superfície que afeta desde as camadas mais superficiais até às mais profundas. Na vibração ocorre uma propagação generalizada pelo material, colocando as partículas em movimento, aproximando-as e assim a aumentar a densidade do material (Moreira, 2008).

A grande limitação da aplicação exclusiva da compactação por pressão é a profundidade que ela atinge, pois esta só é aplicável às camadas mais superficiais. Caso se queira aumentar a profundidade de compactação é necessário aumentar o peso da máquina, solução técnica que pode não ser muito viável. A compactação estática restringe-se somente às camadas superiores do solo e é limitada a determinada profundidade (Moreira, 2008).

A grande vantagem da compactação por vibração é precisamente o facto de, como se refere anteriormente, esta atingir não só as camadas superficiais bem como as camadas mais profundas. Caso se queira aumentar a profundidade de compactação recorre-se à utilização de maiores frequências e maiores amplitudes de vibração, mantendo-se o peso do equipamento (Moreira, 2008).

Face ao exposto, os equipamentos de compactação podem agrupar-se em três categorias: compactadores estáticos, compactadores dinâmicos (ou de impacto) e compactadores vibratórios. Adicionalmente, estes são classificados consoante a energia que transmitem ao solo: i) equipamentos leves, de pequena dimensão tais como os saltitões e as placas vibratórias; ii) equipamentos pesados, nos quais se incluem os de maior dimensão como os cilindros de pneu de borracha, rolos metálicos de rasto liso ou de pés-de-carneiro (Moreira, 2008).

Os saltitões e as placas vibratórias são compactadores de impacto ou de vibração dependendo da frequência e amplitude de vibração de pequenas dimensões que são utilizados em locais de acesso difícil aos rolos compressores, tais como trincheiras e valas. Para a utilização destes equipamentos deve-se ter em atenção ao peso próprio dos mesmos. Estes compactadores podem ser manuais ou mecânicos, tendo uma eficácia satisfatória em todos os terrenos. Contudo,

também têm rendimentos baixos o que só os torna economicamente viável só para superfícies pequenas e situações especiais. A camada deve ter entre 10 a 15 cm para solos finos e aproximadamente 15 cm para solos grossos (Moreira, 2008).

Os cilindros de rasto liso são um equipamento pesado constituído por um cilindro oco de aço com rasto liso, o qual pode ser preenchido por areia húmida ou água, este preenchimento deve-se à necessidade de se aumentar a pressão aplicada. Estas máquinas pode ter um, dois ou três rolos e podem ser autopropulsionados ou rebocáveis. Este tipo de cilindro é indicado para solos do tipo cascalho e pedra britada, por exemplo e recorre-se a estes quando é pretendido um acabamento superficial das camadas compactadas de um aterro. Estes cilindros possuem as desvantagens de terem uma pequena área de contacto e de se afundarem em solos moles. Assim, não devem por isso ser utilizados em solos excessivamente plásticos. O facto de compactarem de cima para baixo leva a que as camadas mais profundas não alcancem o grau de compactação adequado (Moreira, 2008).

Os cilindros pés-de-carneiro são constituídos por rolos metálicos contendo saliências de forma troncocónica, cujo objetivo é aumentar a pressão transmitida ao solo, uma vez que, em cada instante o peso total do cilindro é suportado apenas pelos pés que estão em contacto com o solo. Este tipo de cilindro é apropriado para a compactação de solos argilosos e promovem um grande entrosamento entre as camadas compactadas. Ao contrário do cilindro liso, aqui a compactação faz-se por compressão ascendente (Moreira, 2008).

Os cilindros de rodas pneumáticas são equipamentos muito eficientes na compactação de materiais de granulometria fina e arenosa. A área de contacto é variável, uma vez que é função da pressão dos pneus e do peso do equipamento. São obtidos bons resultados usando cilindros com cargas elevadas, mas para que este processo seja viável deve haver um planeamento minucioso do processo de compactação para evitar a rotura do solo (Moreira, 2008).

Os cilindros vibratórios são máquinas para compactar que possuem uma determinada frequência de vibração que, influencia o modo de vibração. Estes tipos de cilindros são indicados como eficientes para compactar solos granulares ou areias, onde o desempenho dos outros cilindros não é positivo (Moreira, 2008).

A escolha do método deve ser criteriosa e onde o princípio fundamental é atingir o nível de compactação pretendido com boas condições de eficiência (Moreira, 2008).

Assim, para solos coesivos aconselha-se a utilização de rolos pés-de-carneiro, uma vez que a fração considerável de partículas finas e muito finas (silte e argila) condicionam bastante a compactação. Tal, deve-se à importância que as forças de coesão desempenham nestas partículas. Para se conseguir uma boa compactação em argilas é necessário que estas exibam um teor em água próximo do ótimo (Moreira, 2008).

Para solos granulares (saibros e areias saibrosas) com reduzida percentagem de partículas finas, dada a inexistência de coesão entre as partículas que constituem o solo, a compactação só será concretizada com recurso a máquinas vibratórias. A eficácia do processo depende da frequência da vibração, para tal é conveniente adotar máquinas com mecanismos de regulação da frequência. Note-se que, neste tipo de solos, o teor em água não é preponderante (Moreira, 2008).

No caso de misturas de solos, que não apresentem características típicas dos dois tipos apresentados em cima, recomenda-se que caso o solo apresente plasticidade se utilize cilindros de pés-de-carneiro, e caso o solo apresente ser argiloarenosos não plásticos que se utilize cilindros de pneus (Moreira, 2008).

2.1.2. Compactação de solos

Tal como foi referido na secção 2.1 a compactação de solos enquadra-se na estabilização mecânica de solos, este método encontra-se descrito neste capítulo.

2.1.2.1. Definição

Segundo Moreira (2008), a compactação pode ser definida, como é referido na secção 2.1 como sendo a ação mecânica onde é aplicada de forma repetida e rápida cargas ao solo, que são suscetíveis de lhe provocar a diminuição do seu índice de vazias, graças essencialmente à redução do volume da sua fase gasosa. Conclui-se assim que ao longo de todo o processo de compactação o teor em água tende a manter-se.

O índice de vazios é um fator que influencia o comportamento do solo, nomeadamente nas suas características de resistência ao corte, deformabilidade e permeabilidade. Assim, quanto menor for o índice de vazios de um solo, maior será a sua resistência ao corte e menor será a sua deformabilidade bem como a sua permeabilidade. Existem algumas exceções, tais como determinados solos argilosos que, devido à sua constituição mineralógica, possuem estruturas que, embora com elevado índice de vazios apresentam uma razoável resistência ao corte e uma baixa deformabilidade.

2.1.2.2. Fatores que influenciam a compactação

Segundo Moreira (2008), os fatores que mais influenciam a compactação são três: i) a água; ii) a energia de compactação e iii) a granulometria do solo.

Água: para uma dada energia de compactação, o peso volúmico seco (γ_d) é uma função do teor em água (ω), como representado na Figura 2-2.

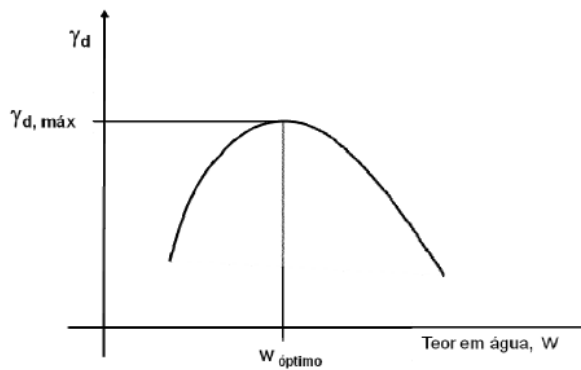


Figura 2-2 - Curva de compactação de um solo argiloso (Moreira, 2008)

Da observação da Figura 2-2 é possível concluir que para cada solo e para um dado nível de energia por unidade de volume, existe um valor do teor em água para o qual a compactação conduz ao máximo valor do peso volúmico seco máximo ($\gamma_{d,máx}$). Este valor do teor em água é apelidado de teor em água ótimo ($\omega_{ópt}$) (Moreira, 2008).

A água desempenha uma dupla função sobre os grãos, daí a forma da curva. Para teores em água reduzidos, a água atua como um lubrificante que reduz o elevado atrito entre os grãos. Assim, a adição de água é benéfica e traduz-se num ganho na eficiência do processo de compactação. Para teores em água elevados, o efeito da compactação tende a diminuir, devido ao facto da água, para a gradeza das cargas aplicadas, ser incompreensível. Deste modo, apesar da intensa lubrificação, verifica-se uma ineficácia da expulsão do ar dos vazios do solo porque a carga transmitida ao solo durante o processo de compactação é absorvida pela sua fase líquida, isto é, a água (Moreira, 2008).

Através da Figura 2-3 observa-se que o ramo da curva de compactação correspondente a valores do teor em água superiores ao máximo tende a assumir posições paralelas à curva correspondente a 100% de grau de saturação. A distância “d” entre esse ramo da curva de compactação e a referida curva de 100% de saturação constitui uma medida de quantidade de ar contida no solo compactado (Moreira, 2008).

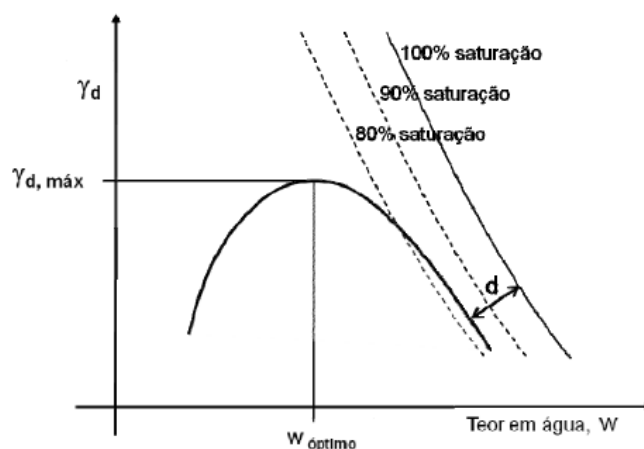


Figura 2-3 - Curvas de saturação de um solo argiloso (Moreira, 2008)

Energia de compactação: quando um mesmo solo é compactado pelo mesmo método, mas com diferentes níveis de energia, verifica-se que, à medida que se vão aumentando esses níveis de energia, aumenta também o peso volúmico seco correspondente e, conseqüentemente, os valores máximos dessas baridades. Ao mesmo tempo que ocorre este fenómeno os valores dos teores em água ótimos diminuem (Moreira, 2008).

Na Figura 2-4 estão representadas curvas de compactação para um mesmo solo e para diversos níveis de energia, tais que $E_1 > \dots > E_3 > E_2 > E_1$.

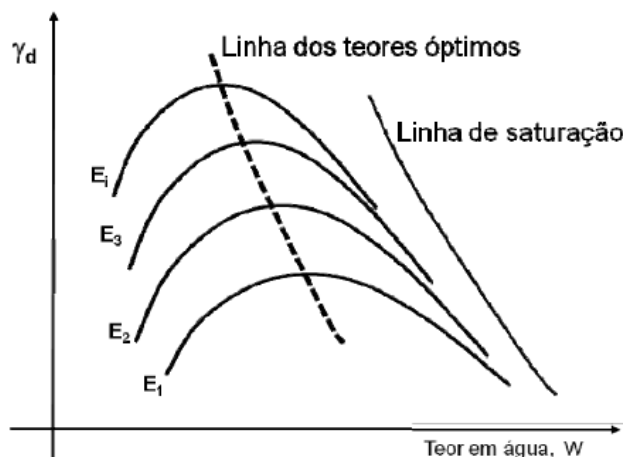


Figura 2-4 - Curvas de compactação de um solo com energias diferentes

Da Figura 2-4 observa-se que a linha que une os máximos das curvas tem um andamento próximo do paralelo à linha de saturação. É ainda visível que para as diferentes curvas os ramos situados à direita dos máximos tendem a sobrepor-se, mostrando assim que para um dado tipo de compactação existe um limiar do grau de saturação que não é possível ultrapassar (Moreira, 2008).

Granulometria do solo: solos com maior percentagem de partículas grossas proporcionam maiores valores de peso volúmico seco que solos demasiados finos para a mesma energia de compactação. As curvas de compactação dependem da granulometria mais ao menos grosseiras dos solos. Na Figura 2-5 observa-se que os solos argilosos plásticos na curva 3 apresentam valores de peso volúmico seco máximo reduzidos. Na curva 1 é apresentado um solo com quantidades de areia consideráveis que exibem índices de plasticidade baixos, com peso volúmico seco máximo superiores, ocorrendo para teores em água ótimos reduzidos. A forma das curvas depende do índice de plasticidade, por isso na curva 1, a curva é mais fechada, isto é, a gama de teores em água mede a diferença entre os limites de plasticidade e de liquidez, é mais reduzido (Moreira, 2008).

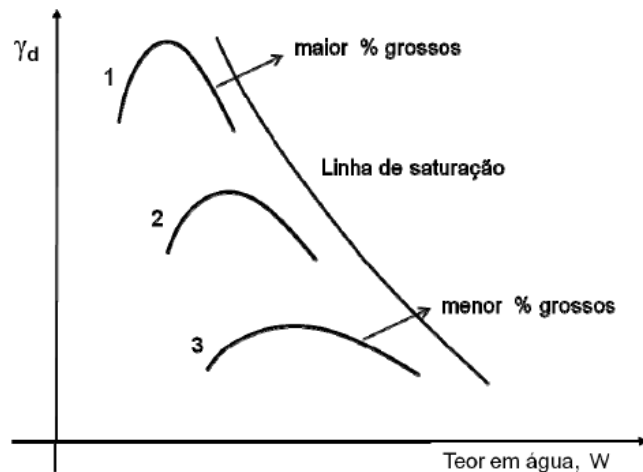


Figura 2-5 - Curvas de compactação de solo com percentagens de grossos diferentes (Moreira, 2008)

2.2. Caracterização do comportamento mecânico dos solos

O comportamento mecânico de um solo engloba todos os aspetos do seu comportamento relacionados, direta ou indiretamente, com os processos de mobilização de resistência ao corte, variação de volume e deformação (Prietto, 1996).

O conhecimento do comportamento do solo é fundamental para o cálculo de fundações de estruturas, para o cálculo de impulsos de terra que permitem o dimensionamento de muros de suporte, para o cálculo da estabilidade de aterros, para a previsão de assentamentos e para o dimensionamento de pavimentos rodoviários.

Existem diversos tipos de ensaios que permitem a avaliação da referida resistência de uma forma mais ou menos empírica, especificando aqui o ensaio CBR e o ensaio de compressão simples não drenado e não confinado.

2.2.1. Comportamento a curto e a longo prazo

A resistência ao corte de um solo como a máxima pressão de corte que o solo pode suportar sem sofrer rutura, ou a tensão de corte do solo no plano em que a rutura ocorre no momento da rutura. Em Mecânica dos solos, a resistência ao corte envolve duas componentes: i) ângulo de resistência ao corte e ii) coesão (Cruz, 2012).

Consoante o tipo de solo, deve-se proceder à verificação da segurança a i) curto prazo e/ou ii) a longo prazo (Velloso & Lopes, 2002).

2.2.1.1. Parâmetros de resistência

Tal como referido anteriormente a resistência ao corte é determinada a partir de dois parâmetros, o ângulo de resistência ao corte e a coesão. Estes dois parâmetros constituem uma característica do solo cujo valor importa conhecer, por forma a avaliar a estabilidade das fundações e taludes de aterro ou escavação (Faria, 2005).

Dependendo das características de drenagem do solo, há diferentes situações a serem verificadas. Nos solos de drenagem lenta, como é o caso dos solos argilosos saturados há que verificar duas situações: i) segurança a curto prazo ou não drenada e ii) segurança a longo prazo ou drenada (Velloso & Lopes, 2002).

Em princípio, para o caso das fundações, cujo carregamento produz excesso de pressão intersticial (pressão que o fluido exerce no interior dos poros dos elementos porosos) a segurança aumenta com o tempo, uma vez que os excessos de pressão intersticial se dissipam com o tempo, causando um aumento de tensões efetivas e, conseqüentemente, de resistência. E assim, a segurança a longo prazo é maior (Velloso & Lopes, 2002).

Os parâmetros de resistência considerados nesta investigação são o CBR e o q_u , sendo que o primeiro é um índice de resistência mas já o segundo é uma medição mais concreta e direta da resistência de um solo. Importa referir que neste trabalho a resistência dos solos não será avaliada pelas suas propriedades intrínsecas, mas sim pelos parâmetros de resistência CBR e q_{ult} .

2.2.2. Quantificação da resistência

É de extrema importância a quantificação da resistência dos solos. Para tal, é necessário proceder-se a ensaios com a finalidade de obter os valores da resistência dos diferentes solos. Estes valores da resistência são obtidos através dos valores do ângulo de resistência ao corte e coesão. Neste trabalho vai-se desenvolver melhor o comportamento a curto prazo.

2.2.2.1. CBR

O ensaio que é mais frequentemente utilizado para avaliar a resistência mecânica de um solo em engenharia geotécnica rodoviária é o ensaio de CBR, devido à sua facilidade de execução. Este valor vem expresso em percentagem uma vez que é a relação entre a força de penetração no provete de determinado solo expressa em quilogramas-força e a força correspondente à mesma penetração num provete padrão expressa nas mesmas unidades. Este resultado é tido como valor de referência utilizado em projetos de dimensionamento de pavimentos como refere Cunha (2014).

2.2.2.2. q último, q_u

O valor do q_u é obtido através do ensaio de compressão simples não confinado (UCS) realizado aos solos em estudo. Este valor corresponde à força máxima registada no decorrer do ensaio UCS e corresponde à resistência máxima dos provetes à compressão, parâmetro este que é bastante importante na caracterização do comportamento dos solos quando sujeitos a compressão. Este valor é obtido através da composição de um gráfico tensão-extensão que é construído com as grandezas medidas durante o ensaio como sugere Teles (2013).

2.2.3. Módulo de deformabilidade, E

O módulo de deformabilidade mede a rigidez de um solo quando este é submetido a uma tensão externa de tração ou compressão. Assim sendo, é a razão entre a tensão aplicada e a deformação

sofrida pelo corpo, quando o comportamento é linear. Quanto maior o módulo de deformabilidade, maior é a tensão necessária para o mesmo grau de deformação, logo mais rígido é o material (Barbim, 2013).

Existem duas formas de definir o módulo de deformabilidade a partir da curva tensão-deformação: o módulo i) tangente à origem e ii) secante para um dado nível de tensão ou deformação (Vilar & Bueno, 2004).

Um procedimento bastante usual é usar o módulo secante para um nível de tensão determinado em laboratório. A principal razão apontada refere-se à perda de resistência da amostra, a particularidades da amostra (microfissuras), e à restituição das tensões existentes *in situ*. Para superar estes problemas tem-se sugerido submeter a amostra a sucessivos ciclos de carga e descarga após compactação da amostra. Para cada ciclo determina-se o módulo tangente para metade da tensão de trabalho até que haja constância de valores, daí este módulo ser usado para análise computacional (Vilar & Bueno, 2004).

Ao longo desta dissertação trabalha-se com o módulo de deformabilidade secante (E_{50}), optando-se por trabalhar com um patamar onde é calculado o declive da reta que une a origem da curva tensão-deformação com o ponto do patamar.

2.3. Formulações semi-empíricas para estimativa da resistência do solo

A caracterização laboratorial de qualquer solo é um processo moroso e oneroso. Desta forma, é frequente que o processo de caracterização laboratorial seja complementado com a obtenção de outros parâmetros de resistência, de deformabilidade ou outros por via da utilização de expressões semi-empíricas cuja validade está devidamente fundamentada. Embora este assunto não seja um aspeto relevante do presente estudo, opta-se por verificar a aplicabilidade de algumas expressões disponíveis na bibliografia da especialidade aos solos analisados e, assim, apresentar uma ferramenta expedita e credível para a determinação de alguns parâmetros determinados laboratorialmente.

Os resultados dos ensaios de compactação realizados com as técnicas enunciadas na secção 1.1 estão a montante na restante caracterização mecânica dos solos escolhidos. Assim, opta-se por apresentar a formulação proposta por Talukdar (2014), segundo o qual é possível calcular o índice de CBR através das características do solo a estudar, tal relação encontra-se na Equação 2-1.

Equação 2-1 – Formulação para obtenção do CBR em função da plasticidade do solo e dos resultados de ensaios de compactação

$$CBR = 0,127 \times (LL) - 0,1598 \times (IP) + 1,405 \times \gamma_{dm\acute{a}x} - 0,259 \times \omega_{\acute{o}pt} + 4,618$$

onde, LL é o limite de liquidez, IP é o índice de plasticidade, $\gamma_{dm\acute{a}x}$ é o peso volúmico seco máximo e $\omega_{\acute{o}pt}$ é o teor em água ótimo.

A segunda formulação é proposta por Al-Kahdaar & Al-Ameri (2010) e relaciona as características físicas do solo com o q_u , na medida em que se torna possível calcular o q_u com uma solução semi-empírica, tal como mostra a Equação 2-2.

Equação 2-2 – Expressão para a estimativa do q_u em função da plasticidade do solo e dos resultados de ensaios de compactação

$$q_u = 186,3 - 172,5 \times \frac{\omega_{\text{ópt}} - LP}{LL - LP} + 24,2 \times \left(\frac{\omega_{\text{ópt}} - LP}{LL - LP} \right)^2$$

onde, $\omega_{\text{ópt}}$ é o teor em água ótimo, LP é o limite de plasticidade e LL é o limite de liquidez.

Por fim, apresenta-se a solução empírica proposta por Paige-Green & Du Plessis (2009) que relaciona o CBR e o q_u através da Equação 2-3.

Equação 2-3 – Relação entre o q_u e o CBR

$$q_u = 15 \times CBR^{0,88}$$

Note-se que os vários parâmetros e grandezas geotécnicas presentes nas expressões anteriores são alvo de uma descrição mais detalhada no capítulo 3.

2.4. Considerações finais

Neste capítulo é feita uma breve revisão do conceito de compactação e de resistência ao corte. Adicionalmente, é feito um paralelismo entre o processo de compactação em obra e a compactação em laboratório, para deste modo, justificar a utilização de diversas técnicas de compactação laboratorial. Por fim são apresentadas algumas formulações semi-empíricas que permitem a obtenção de parâmetros geotécnicos a partir de resultados fidedignos e ensaios laboratoriais. Tendo este trabalho uma grande componente laboratorial interessa analisar quais os procedimentos que, em laboratório permitem replicar o processo de compactação em obra.

3. Materiais, equipamentos e técnicas de investigação

3.1. Materiais

Todos os solos utilizados nos ensaios foram recolhidos no campo em estado natural. Três dos quatro solos utilizados já tinham sido ensaiados em estudos anteriores Lopes (2014) para determinação dos limites de plasticidade, da qual se concluiu que tinham as características pretendidas, já no quarto solo (“Remessa”) efetuaram-se os ditos ensaios para determinação dos limites de plasticidade, segundo a NP 149 (1969), a fim de se puder concluir qual a plasticidade do mesmo. Após recolhidos e identificados os quatro solos, estes foram tratados em laboratório segundo a E 195-1966 para preparar as amostras de solo passíveis de serem utilizados nos ensaios planeados previamente.

A cada solo foi atribuída uma designação consoante a localização da sua proveniência, cujas coordenadas GPS são referidas no Quadro 3-1, e localização espacial (com recurso ao Google Earth) é ilustrada na Figura 3-1.

Muito resumidamente, o solo “Hospital Pediátrico” foi recolhido em Coimbra, num talude situado nas proximidades do Hospital Pediátrico enquanto o solo “Zona Industrial” foi retirado de um talude localizado na zona industrial de Ponte de Sor, o solo “Ladeiras”, foi removido de ladeiras nas imediações de uma pista de motocross também em Ponte de Sor e, o solo “Remessa” foi recolhido no concelho de Pombal junto a uma escavação para a construção de uma via rodoviária.

Quadro 3-1 - Localização dos solos

Designação	Localização	Latitude	Longitude
Hospital Pediátrico*	Coimbra	40°13'23.02''N	8°24'59.78''W
Zona Industrial*	Ponte de Sor	39°15'57.14''N	8°0'57.43''W
Ladeiras*	Ponte de Sor	39°14'30.32''N	7°59'50.62''W
Remessa	Pombal	39°52'15.00''N	8°36'40.00''W

*- Informações obtidas em Lopes (2014)



Figura 3-1 - Localização dos solos a) Hospital Pediátrico, b) Zona Industrial, c) Ladeiras, d) Remessa

3.2. Ensaios de identificação de solos

Para realizar os ensaios de caracterização das propriedades de compactação dos solos é necessário primeiro conhecer as propriedades básicas destes solos, para assim os puder identificar. Assim sendo, realizaram-se diversos ensaios de identificação, tais como a análise granulométrica segundo a E 196-1966, contendo esta a peneiração grossa (partículas > 2mm), a peneiração fina (partículas entre os 0,075mm e os 2mm) e a sedimentação (partículas < 0,075mm), tendo sido traçadas as respectivas curvas granulométricas. Após estes primeiros ensaios, realizaram-se a determinação da densidade das partículas pela NP-83 (1965) e a determinação do teor em água pela NP-143 (1969).

A classificação dos solos é feita segundo a E 240-1970 (Classificação de solos para fins rodoviários) e a Classificação unificada de solos segundo a ASTM D-2487-06.

3.2.1. Análise granulométrica (E196-1966)

Após se realizarem os ensaios referentes à granulometria do solo, obteve-se a curva granulométrica referente ao solo em estudo, que se ilustra na Figura 3-2.

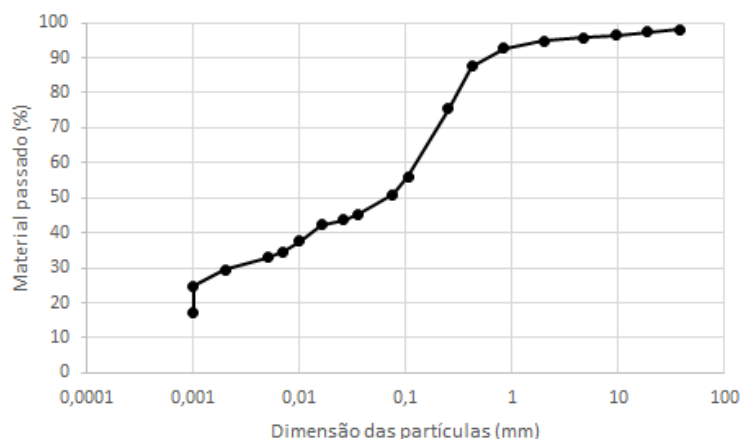


Figura 3-2 - Curva granulométrica do solo “Remessa”

Através dos dados recolhidos da curva granulométrica deste solo e dos restantes três (ver Anexo A) é possível fazer uma interpretação da granulometria dos mesmos, cujos resultados se descrevem no Quadro 3-2.

Quadro 3-2 - Análise granulométrica

	Retidos no Pen.4 (%)	Retidos no Pen.10 (s/ anterior) (%)	Retidos no Pen.10 (%)	Passados no Pen.200 (%)	Interpretação da curva granulométrica
Hospital Pediátrico *	8	8	54	38	Extensa
Zona Industrial *	2	8	31	61	Mal graduada
Ladeiras *	0	3	66	31	Extensa
Remessa	4	1	5	51	Extensa
	Material rejeitado	Material utilizado			

*- Informações obtidas em Lopes (2014)

3.2.2. Limites de Consistência

Através da NP 143-1969 foi possível determinar os limites de consistência dos diferentes solos, limites esses que estão representados no Quadro 3-3 e, por aplicação da Equação 3-1, o índice de plasticidade (IP).

Equação 3-1 - Índice de Plasticidade

$$IP = LL - LP$$

em que, *LL* corresponde ao limite de liquidez e o *LP* ao limite de plasticidade.

Quadro 3-3 - Limites de consistência

Designação	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade
Hospital Pediátrico *	22	15	7
Zona Industrial *	22	17	9
Ladeiras *	35	21	14
Remessa	38	17	21

*- Informações obtidas em Lopes (2014)

3.2.3. Classificação de Solos

A classificação de solos é de extrema importância, uma vez que é através desta que sabemos as características gerais de um determinado solo, onde previamente é necessário proceder à determinação da densidade das partículas tal como aparece no Quadro 3-4, e assim puder classificar o solo quer usando a norma Europeia E 240-1970 quer a ASTM 2487-85 exemplificada no Quadro 3-5.

Quadro 3-4 - Densidade das partículas

Designação	Densidade das partículas
Hospital Pediátrico *	2,5
Zona Industrial *	2,65
Ladeiras *	2,66
Remessa	2,69

*- Informações obtidas em Lopes (2014)

Quadro 3-5 - Classificação dos solos

Designação	Índice de grupo	Grupo/subgrupo	Constituintes significativos	Símbolo do grupo	Nome do grupo
Hospital Pediátrico *	1	A-4	Solo siltoso	SC-SM	Areia siltosa ou argilosa
Zona Industrial *	5	A-4	Solo siltoso	SC	Areia argilosa
Ladeiras *	1	A-2-6	Seixo e areia siltosa ou argilosa	SC	Areia argilosa
Remessa	4	A-6	Solo argiloso	CL	Argila magra

*- Informações obtidas em Lopes (2014)

3.3. Ensaios laboratoriais de Compactação

Na secção 2.1.2 é explicada a importância que o tipo de solo tem na escolha do equipamento de compactação.

Face ao exposto, torna-se primordial simular em laboratório o que acontece em obra. Assim, o presente estudo contempla três tipos diferentes de modo a concluir a mais apropriada para cada tipo de solo. Logicamente que estudos anteriormente realizados fornecem indicações importantes sobre os presumíveis resultados a alcançar.

Os ensaios de compactação eleitos são o ensaio de Proctor, o ensaio de compactação de Harvard utilizando o procedimento MCH-ISEC/2014 e o ensaio de compactação por Vibração.

Estes três ensaios, apesar de partilharem procedimentos idênticos em alguma fase do mesmo são distintos. No primeiro, trata-se de compactação dinâmica por impacto, no segundo por pressão (estática) e o terceiro, como o nome indica, por vibração.

A necessidade de abordar estes três tipos distintos de compactação tem que ver com o facto de, embora o ensaio mais divulgado internacionalmente ser o ensaio de Proctor, as suas características próprias, não lhe permitem replicar de forma conveniente os mecanismos de compactação de todos os meios de compactação existentes na secção 2.1.2.

Seguidamente, descrevem-se detalhadamente os ensaios de compactação anteriormente referidos.

3.3.1. Ensaio de Proctor

Os ensaios laboratoriais de compactação do tipo Proctor surgiram da grande necessidade de controlo da compactação durante os trabalhos em obra. O ensaio consiste na compactação de uma amostra de solo num molde, para assim determinar o teor em água ótimo para o qual corresponde o peso volúmico seco máximo. Para se obter a curva de compactação do solo realiza-se este ensaio com diferentes quantidades de teores em água adicionando volumes de água controlados ao solo. O procedimento de ensaio está normalizado e encontra-se especificado na norma do E197-1966 LNEC.

Esta especificação define 4 tipos de compactação:

- compactação leve (Proctor normal) em molde pequeno;
- compactação leve (Proctor normal) em molde grande;
- compactação pesada (Proctor modificado) em molde pequeno;
- compactação pesada (Proctor modificado) em molde grande;

O que define a compactação leve ou pesada é a energia de compactação que lhe é aplicada, sendo esta exercida com um determinado número de pancadas com um pilão de peso normalizado caindo de uma altura constante e especificada sobre cada camada de solo, conforme resume o Quadro 3-6.

Este processo de compactação tanto pode ser realizado manualmente como de forma automática, solução técnica adotada neste trabalho de investigação.

Quadro 3-6 - Ensaio de Proctor (E197-1966 LNEC)

		Tipo de compactação			
		Leve (Proctor normal)		Pesada (Proctor modificado)	
Molde	Diâmetro	102mm	152mm	102mm	152mm
	Altura	117mm	114mm	117mm	114mm
Pilão		2,49kg	2,49kg	4,54kg	4,54kg
Altura de queda		30,5cm	30,5cm	47,5cm	47,5cm
Nº de camadas		3	3	5	5
Nº de pancadas p/ camada		25	55	25	55

A energia específica de compactação é definida pela energia de compactação à unidade de volume e é traduzida pela Equação 3-2.

Equação 3-2 - Energia de compactação

$$E = \frac{N \times n \times W \times h}{V}$$

onde, N é o número de pancadas por camada, n é o número de camadas de solo no interior do molde, W é o peso do pilão, h é a altura de queda do pilão e V é o volume do molde.

Segundo Santos (2008), a energia específica do ensaio de compactação leve é aproximadamente $0,6 \text{ MNm/m}^3$ e a da compactação pesada ronda os $2,7 \text{ MNm/m}^3$. Estas energias de compactação têm o objetivo de reproduzir a compactação a realizar na obra em laboratório.

O tamanho do molde a utilizar depende da granulometria do solo a ensaiar. Quando a percentagem de material retido no peneiro nº4 (4,75 mm) é inferior a 20% utiliza-se o molde pequeno. Para os restantes casos utiliza-se o molde grande, desde que a percentagem retida no peneiro de malha 19mm (3/4'') seja inferior a 20%. Caso contrário a especificação E197-1966 deixa de ser aplicável.

Para a realização deste ensaio é necessário preparar previamente as amostras a ensaiar, tal como é descrita na E197-1966 do LNEC.

- ➔ 1) seca-se a amostra ao ar, espalhando-a em camada pouco espessa sobre um tabuleiro adequado. Desfaz-se os torrões, procede-se à peneiração e retira-se o material retido no peneiro de 50,8mm
- ➔ 2) esquartela-se a amostra e separa-se o solo em 2 frações. Pesam-se essas frações, se a fração retida for superior a 20% o ensaio não tem significado. O material retido no peneiro de 19,0mm é substituído por igual massa de material retido no peneiro 4,76mm (nº4) e passado no peneiro de 19,0mm. Junta-se este material à fração mais fina e homogeneiza-se a mistura e separa-se em frações com cerca de 2 ou 5 kg, dependendo se se vai realizar a compactação leve ou a compactação pesada
- ➔ 3) mistura-se bem cada uma das frações com os teores em água previamente escolhidos.

3.3.2. Ensaio de Harvard usando o Procedimento MCH-ISEC/2014

O procedimento adotado para a realização dos ensaios de Harvard, o MCH-ISEC/2014 baseia-se em diversas teorias, tais como o procedimento proposto por Wilson (1970), também pelo procedimento proposto pelo State Nevada Department of Transportation: Material Division (2008) e por último pelo procedimento de compactação de Proctor segundo sugere Lopes (2014).

As amostras de solo foram previamente tratadas tal como o método exige. O procedimento de compactação segue tal como no ensaio de Proctor com duas cargas, isto é, ensaia-se utilizando uma mola de 20lb e com uma mola de 40lb, para assim simular a compactação leve e pesada respetivamente.

Uma descrição detalhada do método é apresentada no Anexo B, estando detalhadamente descrito em Lopes (2014). Resumidamente, a compactação com a mola de 20lb ou com a mola de 40lb traduz a energia de compactação, sendo esta aplicada através da pressão efetuada com o martelo, que 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 10 pressões em zonas diferentes da amostra (segundo um padrão pré-estabelecido em Lopes, 2014), cobrindo-se completamente a superfície do solo. Este ciclo de 10 pressões deve ter uma duração de 15 segundos aproximadamente e deve ser repetido por 3 vezes até fazer um máximo de 30 pressões em 45 segundos. Cada pressão é finalizada libertando a força máxima imprimida no martelo e posicionando-o na nova posição, devendo-se garantir a verticalidade do martelo durante todo o ensaio. No Quadro 3-7 resumem-se as principais características do ensaio.

Quadro 3-7 - Ensaio de Harvard – Procedimento MCH-ISEC/2014

		Tipo de compactação	
		Leve (20lb)	Pesada (40lb)
Molde	Diâmetro interno	33,34mm	33,34mm
	Altura	71,5mm	71,5mm
Nº de camadas		4	5
Nº de pressões/tempo		3 ciclos de 10pressões/15segundo	3 ciclos de 10pressões/15segundo

Neste sistema a energia potencial é a soma da energia potencial elástica e da energia potencial gravítica (Equação 3-3). 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, como se expressa na Equação 3-4.

Equação 3-3 - Energia potencial total

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

Equação 3-4 - Energia potencial elástica

$$E_p = mgh + \frac{1}{2}kA^2$$

Neste caso, a energia cinética é considerada nula, pois o que se pretende obter era a distensão máxima da mola, conduzindo ao valor de zero para a velocidade instantânea da partícula. Logo, considerando o que foi atrás dito a energia mecânica é totalmente potencial, como refere Lopes (2014).

Para uma melhor compreensão do que foi referido anteriormente apresenta-se o Quadro 3-8.

Quadro 3-8 - Cálculo da energia de compactação (Lopes, 2014)

	Mola 20lb	Mola 40lb
Peso do compactador, Wp (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 de camadas	4	5
Volume do molde (cm³)	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)	4,64	12,63

3.3.3. Comparação da energia de compactação entre Proctor e Harvard

Como foi referido anteriormente, a energia aplicada nos ensaios de compactação de Proctor e de Harvard é diferente. A fim de se perceber melhor as diferenças da energia de compactação entre estes dois ensaios, Lopes (2014) sugeriu o Quadro 3-9.

Quadro 3-9 - Energia de compactação em Proctor e Harvard (Lopes, 2014)

	Proctor	Harvard	Proctor	Harvard
	Compactação leve	Mola de 20lb	Compactação pesada	Mola de 40lb
	25 impactos em 3 camadas	30 pressões em 4 camadas	25 impactos em 5 camadas	30 pressões em 5 camadas
	7,48 J/panc	2,42 J/panc	20,35 J/panc	5,25 J/panc
	561,00 J	290,40 J	2543,75 J	787,50 J
	0,59 J/cm ³	4,64 J/cm ³	2,70 J/cm ³	12,63 J/cm ³
Volume do Molde	944 cm ³	62,42 cm ³	944 cm ³	62,42 cm ³

3.4. Ensaio de Compactação por Vibração

O ensaio de compactação por vibração é, à semelhança dos dois ensaios apresentados nas secções anteriores, de extrema importância uma vez que simula em laboratório, o que acontece em obra quando a compactação é feita com recurso a equipamentos vibratórios. A realização deste ensaio não é tão frequente, contudo várias são as situações que obrigam, em obra, a recorrer a equipamentos vibratórios para a correta compactação de solos. O ensaio consiste na compactação de solo num molde, objetivando-se determinar do teor em água ótimo e o peso volúmico seco máximo. Este procedimento é baseado na parte 4 da norma BS1377, de 1990, intitulada “British Standard Methods of test for Soils for Civil Engineering Purposes: Part 4. Compaction-related test: 1990”, com ligeiras adaptações previamente estudadas, e que se demonstraram serem as mais ajustadas às conclusões pretendidas. O procedimento realizado foi também baseado num estudo realizado por Caldeira & Brito (2007), que sugere que se faça uma homogeneização prévia do material, preparando-o para ensaio com um teor em água igual

ao teor em água ótimo que resultou do ensaio de Proctor. De facto, o estudo de Caldeira & Brito (2007) refere que o teor em água ótimo resultante do ensaio de compactação por vibração converge para o teor em água ótimo do ensaio de Proctor, como se observa na Figura 3-3. Segundo este trabalho, a amostra deve ser dividida em 3 partes iguais e colocadas em camadas dentro de um molde de CBR, e onde se vibra cada camada por um tempo de ± 60 s, exercendo-se uma força total entre 300 e 400 N.

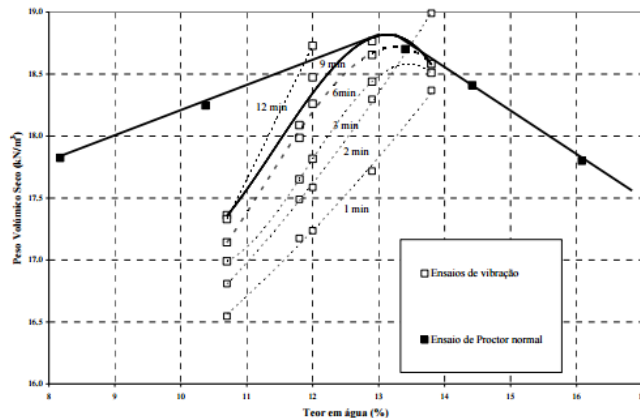


Figura 3-3 - Comparação das curvas de compactação obtidas por vibração com a curva de compactação do ensaio Proctor normal (Caldeira & Brito (2007))

Sendo assim definiu-se tal como no ensaio de Proctor e de Harvard dois tipos de compactação: a leve e a pesada. Tendo por base o procedimento do ensaio de Proctor, na compactação leve divide-se o solo por três camadas enquanto na compactação pesada em cinco camadas. Inicialmente, e baseando-se em Caldeira & Brito (2007), aplicou-se um tempo de vibração de ± 60 segundos. Contudo, rapidamente se observou que com este tempo existia uma grande produção de energia térmica que fazia com que houvesse aquecimento do solo. Na compactação leve, a variação era de $5,0^{\circ}\text{C}$ enquanto na compactação pesada, a variação alcançava os 20°C . Este aumento de temperatura culminava em perda de água durante a vibração, alterando assim o teor em água ótimo do solo, não havendo coerência de resultados. Após essa observação decidiu-se diminuir esse tempo de vibração para metade, isto é, ± 30 segundos, tendo-se rapidamente observado que a produção de energia térmica não era assim tão elevada relativamente à primeira solução. Foi medida a temperatura ao longo de todo o ensaio e verificou-se que esta variação não era muito significativa, atingindo, no máximo, aproximadamente metade dos valores de diferença de temperatura observados aquando a compactação por um minuto por camada. Note-se, no entanto que, na compactação pesada, verifica-se uma maior variação de temperatura uma vez que o tempo de vibração é superior, pois tem duas camadas a mais do que a compactação leve. Na secção 4.3.2 são apresentados os resultados dos ensaios dos quais resulta esta adaptação ao ensaio de compactação por vibração.

As características gerais do ensaio encontram-se representadas no Quadro 3-10.

Quadro 3-10 - Ensaio de compactação por vibração

		Tipo de compactação	
		Leve	Pesada
Molde	Diâmetro interno	102mm	102mm
	Altura	117mm	117mm
Massa do martelo+ponteira		7307g	7307g
Número de camadas		3	5
Tempo de vibração/camada		3 ciclos de 30s/camada	3 ciclos de 30s/camada

3.4.1. Equipamento utilizado

A correta realização do ensaio requer:

- Molde cilíndrico metálico com 102,0 mm de diâmetro e 117,0 mm de altura. Este possui capacidade para conter 956,04 cm³ de volume de solo. Associados a este molde estão mais acessórios, conforme a Figura 3-4a);
- Ponteira metálica acoplada de uma placa cilíndrica com diâmetro interior de 97 mm, e com uma massa igual 1507,00 g, representado na Figura 3-4b);
- Martelo elétrico, como a Figura 3-4c);
- Cronómetro



Figura 3-4 - Equipamento utilizado na compactação por vibração: a) molde cilíndrico; b) ponteira com placa acoplada; c) martelo elétrico

3.4.2. Montagem do equipamento

Na montagem do molde segue-se o procedimento de Proctor, descrito na especificação E 197-1966 do LNEC, em que, resumidamente, coloca-se o molde cilíndrico na base que lhe corresponde, de seguida procede-se ao aperto das roscas laterais do molde de modo a garantir que fique bem preso. Após este processo finaliza-se com o enroscamento da alonga na parte superior do molde cilíndrico. Esta sequência de montagem é apresentada na Figura 3-5.



Figura 3-5 - Montagem do equipamento

No que se refere à montagem do martelo, a garantia da existência de uma base que garanta a total imobilização do martelo elétrico é de extrema importância. Ao encaixar-se a ponteira com a placa acoplada ao martelo deve ser garantida a sua verticalidade durante todo o ensaio, tal como ilustra a Figura 3-6.



Figura 3-6 - Montagem do martelo usando o sistema do laboratório de Pavimentos Rodoviários do ISEC

3.4.3. Procedimento

Numa primeira fase, prepara-se a amostra, tal como é descrita na Especificação E197-1966 do LNEC.

- ➔ 1) Como em qualquer tipo de compactação é fulcral a preparação prévia da amostra então, esta fase começa com uma secagem em estufa durante pelo menos 12 horas a uma temperatura de 100°C do material desagregado. Passadas as 12 horas e após o arrefecimento do material separam-se cerca de 2100 g de amostra com o auxílio da balança, à qual deve ser acrescentada o teor de água desejado
- ➔ 2) Após a mistura da amostra de solo com o teor de água precede-se à selagem desta mistura num recipiente fechado, que vai a repousar numa câmara de climatização durante aproximadamente 12 horas. Com este procedimento, pretende-se garantir a homogeneização da amostra. Caso não haja disponível câmara de climatização pode-se recorrer à imersão dos recipientes selados em água, tal como mostra a Figura 3-7



Figura 3-7 - Amostras seladas

Seguidamente, inicia-se o procedimento de compactação, processo baseado nos estudos realizados por Caldeira & Brito (2007).

- ➔ 3) O procedimento de compactação começa com a preparação/montagem do equipamento. O molde cilíndrico deve estar bem preso à base, bem como a alonga ao molde. No fundo do molde deve ser colocado papel de filtro com um diâmetro ligeiramente inferior ao diâmetro interior do molde. A colocação do papel de filtro tem a finalidade não só de evitar a perda de finos pelo friso entre a base e o molde, mas também de permitir uma maior facilidade da remoção posterior do molde
- ➔ 4) Seguidamente, coloca-se a ponteira com a placa acoplada no martelo elétrico
- ➔ 5) Retira-se a amostra selada da câmara de climatização e dispõe-se num tabuleiro. Após esta operação deve proceder-se à divisão de porções iguais consoante o número de camadas pretendidas. Com o auxílio de uma pá de pedreiro ou equivalente coloca-se uma das porções no interior do molde, aproxima-se a placa da amostra de solo dentro do molde, liga-se o martelo e vibra-se durante 30 segundos
- ➔ 6) Para as restantes camadas utiliza-se o mesmo procedimento até finalizar a compactação. Com a conclusão deste processo remove-se a alonga, tal como é mostrado na Figura 3-8



Figura 3-8 – Primeira camada compactada por vibração

- 7) Separa-se o molde cilíndrico da base e remove-se o papel de filtro previamente colocado na base metálica. Já com o molde no tabuleiro, rasa-se o topo para assim extrair o material excedente, tal como está ilustrado na Figura 3-9.



Figura 3-9 - Molde compactado por vibração rasado

- 8) Pesa-se o molde previamente rasado, registando o valor do molde com a amostra compactada no seu interior
- 9) A amostra de solo deve ser extraída do molde, da qual se retiram duas porções de solo que são colocadas em cápsulas previamente pesadas. Procede-se ao registo do peso das cápsulas com o solo húmido. De seguida estas cápsulas devem ser introduzidas em estufa durante pelo menos 12 horas a uma temperatura de aproximadamente 110°C
- 10) Findo esse período de secagem em estufa, retira-se as cápsulas, deixando-as arrefecer num exsiccador, conservando assim as condições de humidade atingidas em estufa para, após o total arrefecimento, registar o peso das cápsulas com o solo seco. A determinação do teor em água segue a NP84, como demonstrada na Equação 3-5, e consequentemente determinação do peso volúmico seco, tal como mostrado na Equação 3-6 tal processo encontra-se ilustrado na Figura 3-10.

Equação 3-5 – Teor em água

$$\omega (\%) = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100$$

onde, m_1 é a massa da cápsula, m_2 é a massa da cápsula com a amostra húmida e m_3 é a massa da cápsula com a amostra após secagem em estufa.

Equação 3-6 – Peso volúmico seco

$$\gamma_d (kN/m^3) = \frac{(100 \times \gamma)}{(100 + \omega)} \times 9,81$$

onde, ω é o teor em água e γ_d é peso volúmico seco.

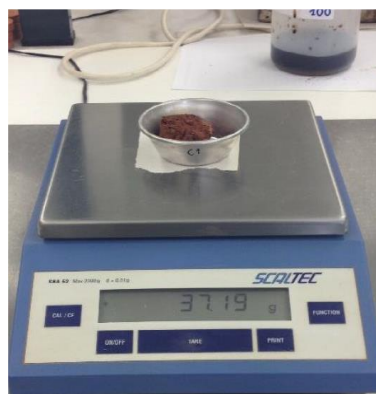


Figura 3-10 - Cápsulas com amostras de solo compactado por vibração

3.4.4. Cuidados a ter

Devem ser tomados diversos cuidados tanto ao nível da manipulação do equipamento como no que se refere à limpeza e à manutenção.

O martelo deve estar completamente imobilizado a uma estrutura de apoio que impeça movimentos, bem como a ponteira que é colocada no martelo, obtendo assim a sua verticalidade e garantindo a correta compactação e aplicação da carga.

Deve-se garantir também todas as regras de segurança que existem em laboratório, tais como a utilização de luvas, máscara de proteção para evitar a inalação de pó, auscultadores para aquando a vibração com o martelo devido ao grande ruído sonoro que este processo produz.

3.5. Ensaio do Índice de Suporte Califórnia (CBR)

O ensaio mais frequentemente utilizado para avaliação indireta da resistência mecânica de um solo é o ensaio de CBR que, quer pela facilidade de execução quer pela sua grande utilização na área de engenharia de pavimentos, é um índice que geralmente é utilizado como referência nos projetos de dimensionamento de pavimentos.

O ensaio CBR tem assim como objetivo estimar um índice de resistência de um solo previamente compactado para a sua utilização principalmente no dimensionamento de pavimentos.

A sequência do ensaio inicia-se com a determinação da humidade ótima e do peso específico seco com recurso a ensaio de compactação, procedendo-se de seguida à determinação das propriedades expansivas do material e à determinação do então Índice de Suporte Califórnia (CBR), como sugere Cunha (2014).

Em Portugal existe uma especificação do LNEC que descreve tudo o que é referente a este ensaio: a E 198-1967.

3.5.1. Equipamento utilizado

Tal como sugere a especificação E 198-1967 são necessários diversos aparelhos e utensílios, designados seguidamente:

- molde cilíndrico, com 152mm de diâmetro interior, munido de alonga e de uma base perfurada, com furos de diâmetro inferior a 1,5mm;
- espaçador com diâmetro ligeiramente inferior ao do molde e com uma altura de 64mm;
- pilão de compactação pesada;
- placa perfurada com haste ajustável e um tripé com defletómetro;
- placas de carga com 2,5kg, em que uma delas tem forma de anel e as outras em forma de ferradura, com diâmetro interior de 52mm;
- pistão de penetração com um diâmetro de 50mm, e este deve ser suficientemente longo para passar através das placas de carga e penetrar o solo;
- peneiros ASTM;
- prensa manual ou elétrica capaz de realizar uma velocidade de penetração uniforme de 1 mm/min;
- defletómetro para medir a penetração;
- balança;
- tanque de embebição;
- diversos utensílios, tais como tabuleiros, espátulas entre outros.

3.5.2. Procedimento

Segundo Pires (2013) o procedimento de ensaio compreende 4 fases, sendo as duas primeiras a preparação e moldagem da amostra, que seguem a especificação do LNEC E 198-1967. As outras duas fases dizem respeito à expansão e à penetração.

Para a preparação da amostra segue-se o procedimento tal como no ensaio de compactação pesada de Proctor referida na secção 3.3.1, com a particularidade do teor em água adicionado á amostra ser o teor em água ótimo obtido pela na compactação pesada deste mesmo ensaio.

a) moldagem da amostra:

- ➔ 1) coloca-se o espaçador sobre a base do molde e aperta-se nesta o molde com a alonga colocada. Sobre o espaçador coloca-se uma folha de papel de filtro;
- ➔ 2) dispõe-se o solo em cordão e divide-se em cinco partes iguais;
- ➔ 3) deita-se no molde uma das partes divididas, e com o molde assente numa base fixa compacta-se o solo com 55 pancadas;
- ➔ 4) deita-se no molde outra camada e compacta-se da maneira que foi anteriormente referenciada. Repete-se o processo até completar as 5 camadas;
- ➔ 5) retira-se a alonga e rasa-se o molde;
- ➔ 6) remove-se a base perfurada, o espaçador e o papel de filtro;
- ➔ 7) coloca-se um disco de papel de filtro sobre a base perfurada, inverte-se o molde com o solo compactado e aperta-se a base;
- ➔ 8) determina-se o teor em água com as aparas resultantes da rasamento do molde.

A segunda fase inicia-se com a avaliação da expansibilidade da amostra. Caso se queira ensaiar o CBR imediato não é necessário realizar este processo. Para o CBR passadas 96 horas em embebição deve-se:

- b) determinação da expansão e do ensaio de penetração:
 - 9) mete-se o conjunto no tanque de embebição, assegurando que a água possa entrar pela base perfurada;
 - 10) sobre o provete colocam-se a placa perfurada com haste ajustável, as placas de carga e o tripé com o defletómetro;
 - 11) efetua-se a leitura inicial do defletómetro;
 - 12) deita-se água no tanque de embebição até atingir um nível ligeiramente acima do bordo do molde;
 - 13) conserva-se o provete em embebição durante 96 horas;
 - 14) faz-se a leitura da expansão no defletómetro a cada 24 horas;
 - 15) retira-se o molde do tanque de embebição e deixa-se drenar durante cerca de 15 minutos e retira-se o tripé com o defletómetro do molde;
 - 16) pesa-se o molde com o solo para determinação do peso volúmico e o peso de água absorvida.

Para terminar o ensaio, resta apenas proceder ao ensaio de penetração propriamente dito. Esta última parte do ensaio procede-se da seguinte maneira:

- 17) coloca-se a placa de carga em forma de anel no topo do provete, instala-se o molde na prensa, bem centrado e ajusta-se o pistão ao molde, repondo a zero os extensómetros;
- 18) aplica-se o carregamento com uma velocidade de 1 mm/min, anotando-se a carga e a penetração a cada 30 segundos até que sejam decorridos 6 minutos. Mesmo que o este registo seja feito digitalmente por programas informáticos, é importante que se faça este registo manualmente, para o caso de haver alguma falha.

A fase de expansão e o ensaio de penetração do ensaio de CBR encontram-se ilustradas na Figura 3-11.



Figura 3-11 - Ensaio CBR: – a) fase de expansão; b) ensaio de penetração

3.5.3. Curva força-penetração

Findo o ensaio de penetração e através dos dados recolhidos com este, é possível traçar-se a curva força-penetração. Geralmente o troço inicial da curva é convexa. Contudo, em algumas ocasiões o troço inicial é côncavo, devendo-se proceder a uma correção. Esta correção consiste no traçado de uma tangente à curva no ponto de inflexão, conforme a Figura 3-12 tomando-se, como nova origem, o ponto de interseção da tangente com o eixo das penetrações.

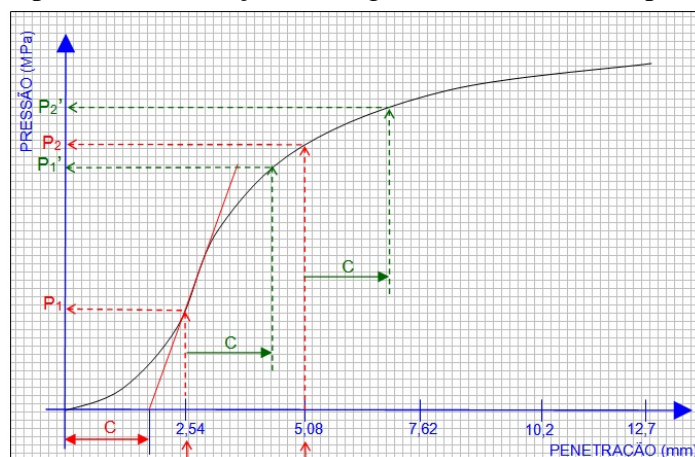


Figura 3-12 - Correção curva força-penetração (<http://www.ebanataw.com.br/terrapleno/ensaioibr.htm>, 25/11/2016)

3.5.4. Conclusão

Seguindo a especificação do LNEC E 198-1967, deve-se através do gráfico obtido, retirar os valores das cargas associadas às penetrações de 2,5 e 5,0mm. O cálculo do CBR é expresso em percentagem, sendo obtido pela divisão entre a pressão resultante do ensaio pela pressão padrão, conforme a Equação 3-7.

Equação 3-7 - Cálculo CBR

$$CBR (\%) = \frac{x}{y} \times 100$$

onde, x é a força em quilogramas-força, correspondente a uma dada penetração no provete de solo, e y é a força, também expressão em quilogramas-força correspondente à mesma penetração num provete padrão.

Existem valores normalizados na especificação E 198-1967 para a curva força-penetração. Geralmente, o CBR é determinado a partir das forças corrigidas correspondentes às penetrações de 2,5mm e 5,0mm, dividindo-as pelas forças normalizadas de 1355 e 2033kgf, respetivamente. Toma-se em norma o valor do CBR do solo correspondente à penetração de 2,5mm. Caso o valor de CBR para os 5,0mm seja superior ao de 2,5mm deve repetir-se o ensaio para confirmar mesmo esta superioridade e, caso se verifique, adota-se como CBR o valor da penetração de 5,0mm.

Para calcular a expansão, relativa utiliza-se a Equação 3-8.

Equação 3-8 - Cálculo expansão

$$\text{Expansão (\%)} = \frac{L_f - L_i}{H} \times 100$$

onde, L_f é a leitura do defletómetro no fim do período de imersão, L_i é a leitura do defletómetro no início do período de imersão e H é a altura do provete antes da imersão.

3.6. Ensaio de Compressão Simples não Confinado (UCS)

Segundo o Department of Construction Engineering Chaoyang University of Technology (DCECUT, Advanced Geotechnical Laboratory, 2004), o teste à compressão simples de amostra não confinada é de longe o método mais popular e mais comum dos testes de resistência dos solos, uma vez que o procedimento é rápido e económico em comparação com outros. Este método é usado principalmente para solos saturados e coesivos, sendo este ensaio inapropriado para areias secas ou argilas de fracas ligações. Para realizar um teste à compressão simples de amostra não confinada, a amostra deve ser previamente tratada e tornada cilíndrica de tal maneira que as suas extremidades sejam razoavelmente suaves e que a proporção entre o diâmetro e o comprimento seja aproximadamente 2. A amostra de solo é colocada numa célula de carga e, sobre esta, é colocado um disco acrílico, onde é aplicada a carga axial a uma velocidade constante. A carga é gradualmente aumentada para cortar a amostra, e as leituras da força aplicada e da deformação resultante são registadas periodicamente. O aumento referido continua até o solo desenvolver um plano de corte óbvio ou as suas deformações serem excessivas. Os dados medidos são usados para determinar a resistência de amostra de solo e as suas características tensão-deformação.

Neste ensaio não existe qualquer restrição de movimento lateral, podendo o provete deformar-se livremente nesta direção.

Finalmente, a amostra é seca em estufa para determinar o seu teor de água. A carga máxima por unidade de área é definida como a resistência à compressão simples não confinada, qu . No teste à compressão simples de uma amostra não confinada, é assumido que nenhuma água é perdida pelos poros da amostra durante a preparação ou durante o processo de corte. Uma amostra saturada irá manter-se saturada durante o teste sem nenhuma alteração no seu volume, teor de água ou índice de vazios. Segundo o Department of Construction Engineering Chaoyang University of Technology (2004), a amostra é mantida unida por uma tensão de confinamento efetiva, que resulta de pressões intersticiais negativas (originadas por meniscos que se foram entre as partículas da amostra). As pressões intersticiais não são medidas neste tipo de ensaio triaxial. Consequentemente, a tensão efetiva é desconhecida. Assim, a resistência ao corte não drenada medida neste teste é expressa em termos da tensão total.

3.6.1. Equipamento de Ensaio

Para a realização do ensaio de compressão simples não confinado é necessária uma prensa triaxial, tal como a que é representada na Figura 3-13. A prensa utilizada é uma prensa

produzida pela Wykeham Farrance, sendo o modelo Trittech 50 kN com as características representadas no Anexo C. O sistema para recolha de informações utilizado foi o Triaxial Automated System (Load Frame type) da GDS Instruments, que é um equipamento triaxial convencional. A célula de carga, que regista a carga aplicada, está montada num maciço de reação imóvel enquanto que a amostra é colocada sobre um pedestal que repousa numa base móvel. Com recurso a controladores de pressão (que nos ensaios UCS não são necessários) e ao *software*, é possível controlar o movimento da base móvel. O sistema pode ser configurado como um aparelho de ensaio de multi-estação, tendo sido criada uma estação somente para este ensaio. Aliás, o *software* de aquisição de dados foi atualizado para a versão mais recente durante a realização desta dissertação. Para realizar uma correta leitura, utilizou-se defletómetro e uma célula de carga Mil U400 com uma capacidade de 500kg.



Figura 3-13 – Prensa triaxial do modelo Trittech 50 kN

3.6.2. Calibração dos Instrumentos de Leitura

Antes de iniciar qualquer ensaio, seja ele laboratorial ou *in situ*, é primordial verificar se os instrumentos de medição mantêm as suas características de qualidade. Para tal, deve proceder-se à calibração dos instrumentos, operações indispensáveis para validar as indicações fornecidas pelos instrumentos de medição.

As operações de calibração e de verificação são ambas baseadas na comparação do instrumento de medição com um instrumento padrão de modo a determinar a sua exatidão, como é referido por Alves (2003).

A calibração dos instrumentos de leitura serve para transformar sinais elétricos registados pelos transdutores em grandezas físicas para, assim, observar o real estado do material estudado.

3.6.2.1. Célula de carga

Para a calibração da célula de carga (secção 3.6.1), existem 2 métodos, o método com recurso a pesos mortos ou o método eletrónico, usando uma célula de carga eletrónica. Neste trabalho, optou-se pela calibração com recurso ao método eletrónico, tendo sido utilizada uma célula de carga da NovaTech do tipo F256CFROKN, (ver Figura 3-14), de características S/N 24398 de

10kN, sido esta cedida pelo Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

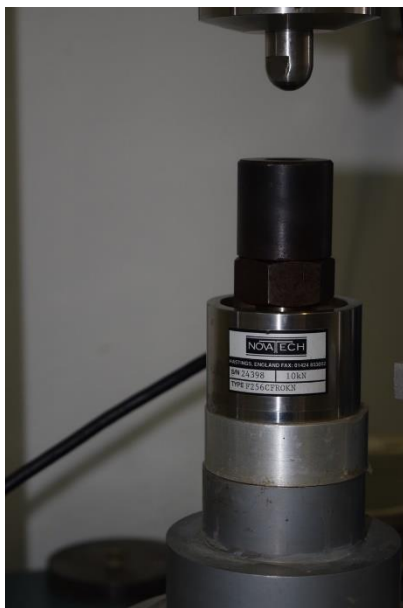


Figura 3-14 – célula de carga eletrónica

A célula de carga de calibração foi colocada no pedestal da prensa, sendo feito o ajuste da célula de carga ao topo do triaxial. Seguidamente, foram aplicados patamares de deformação ao pedestal, comparando a leitura das células de carga de calibração com o do equipamento, da qual resultou a reta de calibração da Figura 3-15.

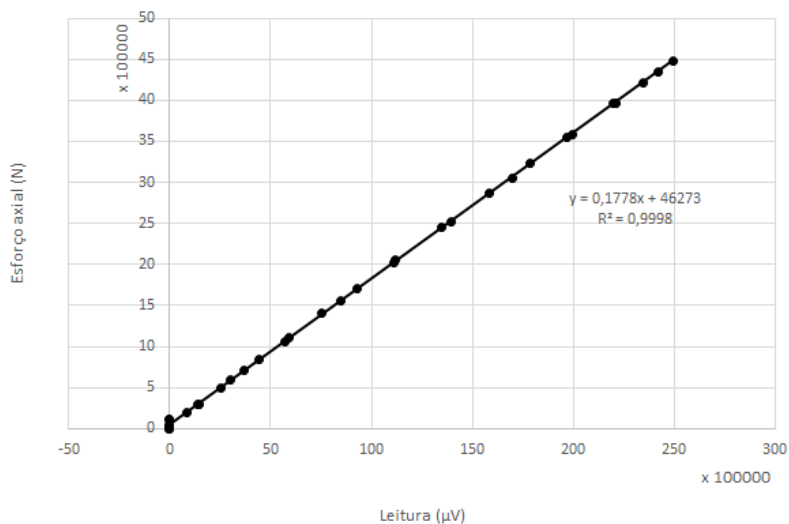


Figura 3-15 – Gráfico de calibração da célula de carga

Da observação da Figura 3-15, conclui-se que o comportamento é linear entre os impulsos elétricos e a grandeza física medida, no gráfico realça-se que o valor de “ R^2 ” é praticamente 1, logo o equipamento está em condições de uso.

3.6.2.2. Defletómetro

Para a calibração do defletómetro recorreu-se a um micrómetro que está ilustrado na Figura 3-16 cuja margem de erro é 0,001mm.

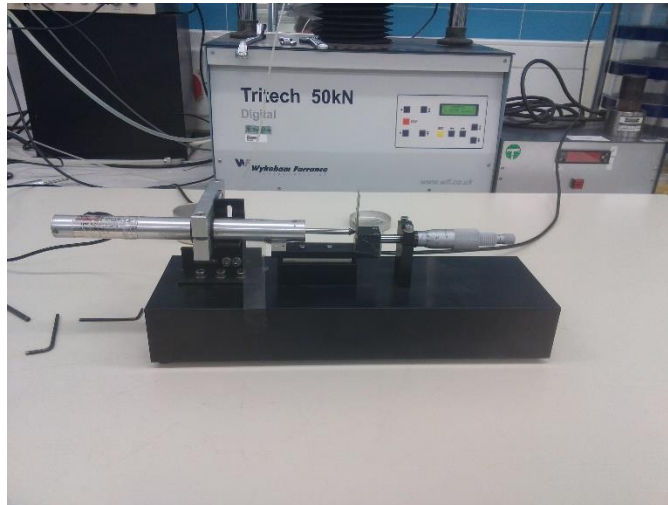


Figura 3-16 Micrómetro

Para a calibração teve-se o cuidado de iniciar a calibração no meio do seu curso, visto ser a posição original de medição no ensaio de corte. Foram aplicados patamares de deformação, inicialmente com uma malha apertada (0,05mm), sendo gradualmente aumentada até atingir o valor de 1mm. Teve-se o cuidado de não se atingirem valores limites de leitura, uma vez que as leituras nos extremos são erradas. Desta calibração resultou a Figura 3-17, da qual se conclui a linearidade da curva de calibração. Esta calibração foi realizada não só à compressão (trajetórias de tensões impostas nos ensaios UCS) mas também a extensão até ao extremo oposto, terminando-se o ensaio na posição inicial.

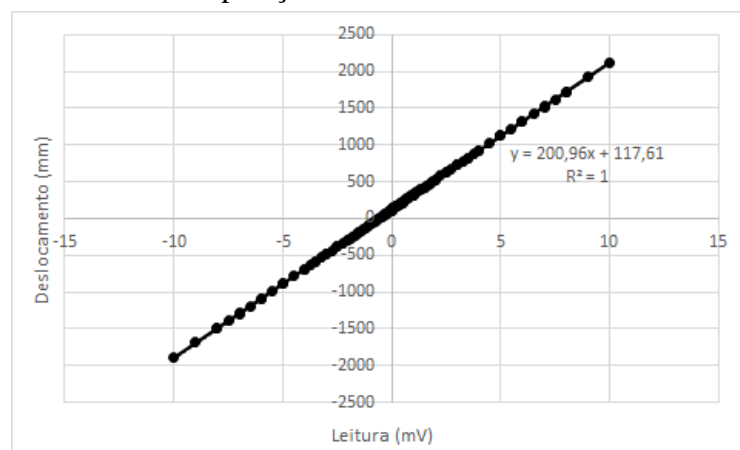


Figura 3-17 - Gráfico de calibração do micrómetro

Da observação da Figura 3-17 conclui-se que o comportamento é linear entre os impulsos elétricos e a grandeza física medida. No gráfico realça-se que o valor de “ R^2 ” está muito próximo de 1, logo o equipamento está em condições plena de uso.

3.6.3. Procedimento

Este procedimento dispõe de 2 fases distintas, em que a fase 1 é a preparação dos provetes e a fase 2 é o ensaio de compressão na prensa triaxial.

3.6.3.1. Preparação do provete

Para se efetuar este ensaio é necessário proceder a uma preparação da amostra. Para tal é necessário compactar previamente os vários solos com os teores em água ótimos, para seguidamente serem submetidos ao ensaio de corte.

Inicialmente compacta-se a amostra com o teor em água ótima consoante o tipo de compactação pretendido (compactação de Proctor, na secção 3.3.1; compactação usando a miniatura de Harvard, na secção 3.3.2 ou a compactação por vibração, na secção 3.4). Faz-se a desmoldagem e colocam-se as amostras da câmara de climatização até se proceder ao ensaio de corte.

As dimensões das amostras estão condicionadas pela dimensão dos provetes resultantes dos ensaios de compactação com o compactador miniatura de Harvard. Assim, em vez de das dimensões usualmente utilizadas na geotecnia (diâmetro de 38mm e altura de 76mm), os provetes têm um diâmetro igual a 33mm e uma altura de 73mm. Este corte é realizado inicialmente através do uso da serra manual até obter uma dimensão próxima da final e concluído através de um torno mecânico, por vezes sendo necessário recorrer a facas ou x-atos para ajustar o tamanho dos provetes às dimensões finais. Para controlar o teor em água, retiram-se amostras de solo das aparas resultantes da preparação de provete, seguindo-se o procedimento estipulado pela NP 83. A Figura 3-18 ilustra os principais momentos da preparação de uma amostra.

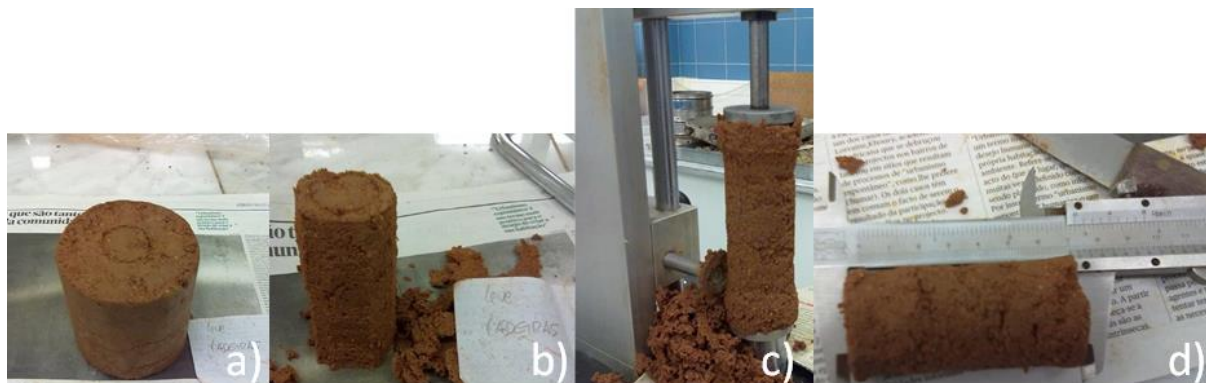


Figura 3-18 - Preparação do provete: a) amostra após compactação; b) corte da amostra com serra manual; c) amostra no torno mecânico; d) amostra com as dimensões pretendidas

3.6.3.2. Compressão na prensa triaxial

O processo de ensaio segue o estipulado pela ASTM 2166-0 Standard Test Method For Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil (2013), bem como posteriores descrições e outros trabalhos científicos. Assim tem-se:

- 1) já com o provete com as dimensões pretendidas, coloca-se na prensa responsável pela compressão simples, tendo a atenção de colocar papel de filtro na base e um disco

acrílico no topo. O papel de filtro protege as ligações hidráulicas da placa da base de detritos de solo e a placa acrílica no topo, que contém uma reentrância a meio garante a centralidade da carga durante o ensaio;

- 2) ajusta-se a base do equipamento até que o provete encoste à célula de carga que está fixa a um maciço de reação;
- 3) pôr a zero todos os instrumentos de leitura;
- 4) ajusta-se a velocidade que se pretende imprimir à base do equipamento, sendo a amostra comprimida contra a célula de carga que está no topo a uma velocidade constante. Para estes ensaios a velocidade de corte deve ter em conta a altura e o diâmetro do provete a ensaiar, tal como refere o Manual of Soil Laboratory Testing volume 2 (Head, 1994), Head refere que a velocidade deve variar entre 0,5% e 2% relativamente à altura. No presente trabalho, optou-se por impor uma velocidade de corte de 0,78mm/min, não utilizando assim nenhum valor extrema, mas sim um valor intermédio;
- 5) com o auxílio de um *software* descrito na secção 3.6.1, inicia-se o ensaio de compressão simples não confinado, que só termina quando for atingida a rutura do provete.

Este processo encontra-se ilustrado na Figura 3-19.

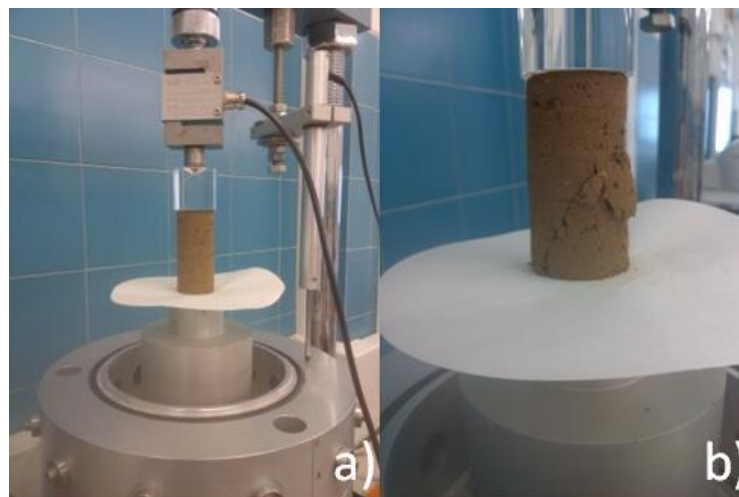


Figura 3-19 - Provetes na prensa triaxial: a) provete antes do ensaio; b) provete depois do ensaio

3.6.4. Tratamento de resultados

Como já foi anteriormente referido, este ensaio foi realizado tendo por base a ASTM 2166-0 Standard Test Method For Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil (2013).

Seguindo o estudo realizado por Teles (2013) a resistência à compressão não confinada (qu) é obtida por uso da Equação 3-9, onde F designa a força aplicada e A , a área de secção transversal do provete.

Equação 3-9 Resistência à compressão não confinada

$$qu = \frac{F}{A}$$

O gráfico tensão-extensão foi construído através das grandezas medidas durante todo o ensaio (força, F , e deslocamento vertical, δv) e com base na geometria do provete (altura, h , e diâmetro, D). Assim, a extensão foi calculada a partir da variação do deslocamento, assumindo-se a distribuição uniforme da deformação do provete, como na Equação 3-10.

Equação 3-10 Extensão do provete

$$\varepsilon = \frac{\Delta \delta v}{h} \times 100$$

A tensão de compressão foi calculada através da Equação 3-9, sendo que para a área A se utilizou uma área transversal da amostra corrigida (A_{corr}), como se representa na Equação 3-11, devido à deformação radial que o provete sofre durante o ensaio de corte Head (1985).

Equação 3-11 Área corrigida

$$A_{corr} = \frac{\pi \times D^2}{4 \times \left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)}$$

Após a obtenção do gráfico tensão-extensão é possível a determinação do módulo de deformabilidade (E_{50}), tal como se encontra ilustrado na Figura 3-20.

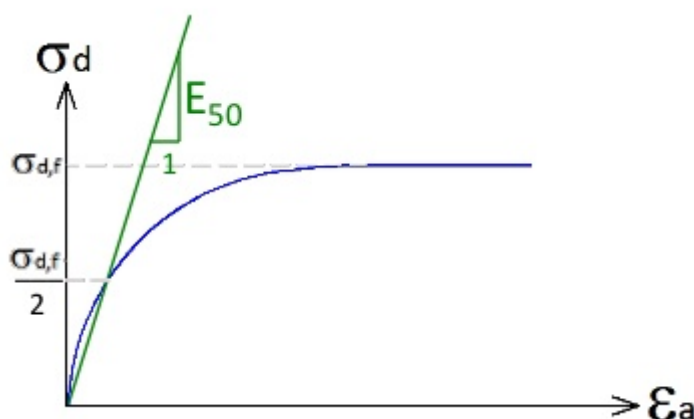


Figura 3-20 – Módulo de deformabilidade (<http://pt.slideshare.net/rogeriojms/mecsolos>, 8/12/2016)

4. Resultados dos Ensaios de compactação

Este capítulo reúne todos os resultados de todos os ensaios de compactação realizados (Proctor, Harvard e por Vibração) bem como todas as considerações e/ou conclusões que deles se possam retirar. Primeiramente são expostos os resultados de cada ensaio individualmente, sendo, nas secções seguintes confrontados com vista a concluir sobre a sua aplicabilidade em função de vários fatores.

4.1. Ensaios de Proctor

O ensaio de compactação de Proctor é o ensaio de referência no estudo da compactação. Qualquer investigação neste campo ficaria incompleta sem a realização destes ensaios. Na presente dissertação apenas foram realizados os ensaios de compactação de Proctor leve e pesada para o solo Remessa, uma vez que os restantes solos foram alvo de estudo em trabalhos anteriores, nomeadamente Lopes (2014). Como se refere na secção 3.3, dos ensaios de compactação resulta a curva de compactação que permite, graficamente, estimar o teor em água ótimo e o correspondente peso volúmico seco máximo. Assim, os resultados são apresentados graficamente pelas curvas de compactação, o que possibilita também uma mais fácil comparação entre os diferentes tipos de compactação utilizados e solos estudados.

4.1.1. Resultados dos ensaios

Os resultados dos ensaios de compactação de Proctor leve e pesada para o solo Remessa encontram-se ilustrados na Figura 4-1.

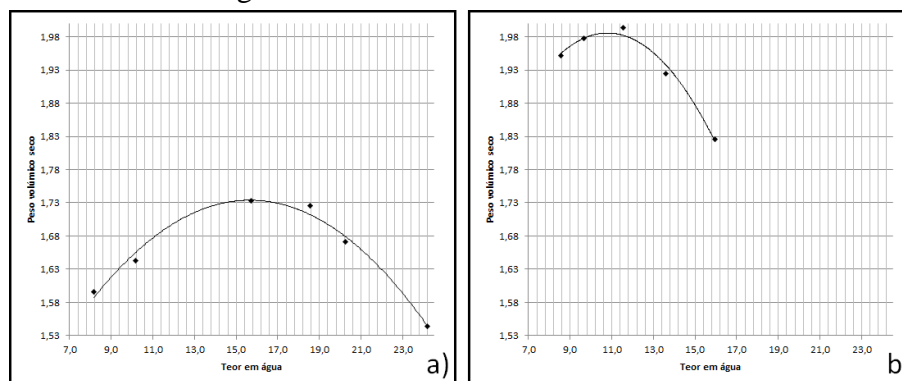


Figura 4-1 - Resultados dos ensaios de compactação para o solo Remessa: a) compactação leve, b) compactação pesada

Como se pode observar na Figura 4-1 a), a curva de compactação leve resulta da realização de seis provetes, três com teores em água inferiores ao ótimo (ramo seco) e outros três com teores em água superiores ao ótimo (ramo húmido).

Já para a compactação pesada, Figura 4-1 b) apenas foi possível preparar nas devidas condições cinco provetes, dois do lado seco e três no ramo húmido.

Os valores de referência para as compactações leve e pesada, isto é, os valores do teor em água e o peso volúmico seco máximo do solo em estudo estão resumidos no Quadro 4-1.

Quadro 4-1 - Valores de teor em água ótimo e peso específico seco máximo do solo Remessa obtidos na compactação leve e pesada de Proctor

	Compactação Leve	Compactação Pesada
ω (%)	15,71	10,84
ρ (g/cm ³)	1,74	1,99
γ_d (kN/m ³)	17,07	19,52

Para cada curva polinomial corresponde um coeficiente de determinação “ R^2 ” que indica a qualidade do ajuste da curva de compactação. Importa referir que quanto maior o valor deste coeficiente maior é o rigor dos ensaios realizados, isto é, menor é a dispersão de resultados. No Quadro 4-2 é possível observar os valores de “ R^2 ”.

Quadro 4-2 - Coeficiente de determinação das curvas de compactação

	Compactação Leve	Compactação Pesada
R^2	0,9809	0,9824

Do Quadro 4-2 observa-se que o valor de “ R^2 ” quer para a compactação leve quer para a compactação pesada está próximo de 1, logo o ajuste está bem realizado.

Para a compactação leve resultou a Equação 4-1 e para a compactação pesada obteve-se a Equação 4-2.

Equação 4-1 Compactação leve Remessa

$$y = -0,0026x^2 + 0,0817x + 1,0942$$

Equação 4-2 Compactação pesada Remessa

$$y = -0,0061x^2 + 0,1323x + 1,2714$$

Os resultados referentes aos solos Hospital Pediátrico, Ladeiras e Zona Industrial, obtidos por Lopes (2014), são apresentados no Anexo D.

4.1.2. Comentários acerca dos ensaios de compactação de Proctor

Durante os ensaios de compactação de Proctor verificaram-se algumas dificuldades tanto durante a compactação nos estados iniciais no ramo seco, como na compactação no ramo húmido.

Para baixos teores em água, por ser reduzido o efeito de lubrificação proporcionado pela água observou-se uma dificuldade no processo de desmoldagem do provete, tal como refere Melo & Ferreira (1981), ocorrendo em casos extremos, a quebra do provete onde ficava a superfície desprovida de material.

Nos casos de compactação com teores em água mais elevados, a energia transmitida ao solo pode ser absorvida pela água, ocorrendo o aumento da pressão de água nos poros. Assim, não se proporciona a saída de ar dos vazios e, logicamente, não se cumpre o princípio da compactação. Ademais, surgiram outros problemas, como a profundidade de penetração do

pilão que geralmente transpunha o limite da alonga ou a dificuldade em rasar a amostra devido à tendência em empolar do solo. Idênticos problemas foram identificados por Lopes (2014).

Para teores em água elevados, verificou-se também que o solo se acumulava junto às paredes do molde, levando à perda de material.

Estes problemas, que também afetaram a compactação leve, foram mais significativos na compactação pesada, uma vez que existe uma maior energia de compactação.

4.2. Ensaio de Harvard

Os ensaios de compactação com recurso ao compactador miniatura de Harvard foram efetuados de acordo com o Método de Compactação de Harvard – ISEC/2014, proposto por Lopes (2014). Com intuito de também validar este método, todos os solos foram ensaiados e, após comparação com os resultados apresentados por Lopes (2014), são tecidas algumas considerações sobre o método MCH-ISEC/2014.

4.2.1. Resultados dos ensaios

Os resultados dos ensaios de compactação utilizando o Método de Compactação de Harvard – ISEC/2014 utilizando a mola de 20lb e a mola de 40lb para o solo Remessa encontram-se ilustrados na Figura 4-2.

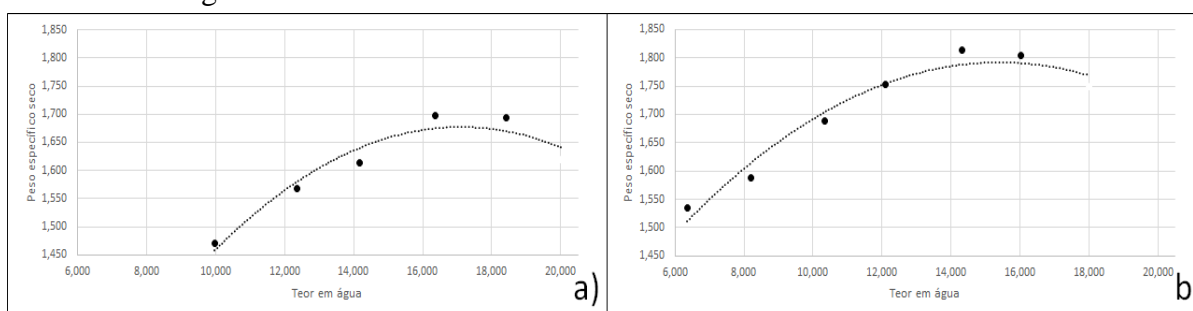


Figura 4-2 - Resultados dos ensaios de compactação para o solo Remessa: a) Compactação com mola de 20lb, b) Compactação com mola de 40lb

Como se pode observar na Figura 4-2 a), a curva de compactação usando a mola de 20lb resulta da realização de cinco provetes, sendo que três deles têm claramente teores em água inferiores ao ótimo (ramo seco), um apresenta teor em água superior ao ótimo (ramo húmido) e um apresenta um teor em água próximo do ótimo. A existência de somente um provete no ramo húmido deve-se ao fato de não se conseguir realizar ensaios com teores em água mais elevados, uma vez que para estes teores elevados, o solo não fica “trabalhável”.

Já para a compactação usando a mola de 40lb (Figura 4-2 b)), prepararam-se seis provetes, quatro do lado seco, um no ramo húmido, e outra que tal como acontece na compactação com a mola de 20lb não se identifica à primeira em que ramo se apresenta, estando próximo do ótimo. De novo, verificou-se não ser possível preparar provetes para teores em água mais elevados.

Os valores de referência para as compactações quer para a mola de 20lb quer para a mola de 40lb, isto é, os valores do teor em água e o peso volúmico seco máximo do solo em estudo estão resumidos no Quadro 4-3.

Quadro 4-3 - Valores de teor em água ótimo e peso específico seco máximo do solo Remessa obtidos na compactação de Harvard

	Compactação usando a mola de 20lb	Compactação usando a mola de 40lb
ω (%)	17,17	15,51
ρ (g/cm ³)	1,68	1,80
γ_d (kN/m ³)	16,48	17,66

No Quadro 4-4 encontra-se o coeficiente de determinação “R²” representado.

Quadro 4-4 - Coeficiente de determinação das curvas de compactação

	Compactação usando a mola de 20lb	Compactação usando a mola de 40lb
R ²	0,9311	0,96

Do Quadro 4-4, observa-se que o valor de “R²” para a compactação usando a mola de 20lb é um pouco baixo, uma vez que se afasta do valor de 1. Isto deve-se a fato de, como se refere anteriormente, não ter sido possível fazer provetes com teores em água mais elevados quer para a compactação usando a mola de 24lb quer para a compactação pesada usando a mola de 40lb. Por esta razão, também se observa um valor baixo, embora não tão baixo como o anterior, para a mola de 40lb.

Para a compactação usando as molas de 20lb e 40lb resultara, a Equação 4-3 e a Equação 4-4, respetivamente.

Equação 4-3 - Compactação usando a mola de 20lb para o solo Remessa

$$y = -0,0043x^2 + 0,1477x + 0,4142$$

Equação 4-4 - Compactação usando a mola de 40lb para o solo Remessa

$$y = -0,0034x^2 + 0,1055x + 0,979$$

Com o intuito de validar o método de preparação de amostras por comparação direta de resultados, os ensaios sobre os restantes solos realizaram-se utilizando os mesmos teores em água ótimos obtidos em Lopes (2014). Os resultados da compactação usando a mola de 20lb bem como as diferenças obtidas comparativamente aos resultados obtidos em Lopes (2014) encontram-se representados no Quadro 4-5.

Quadro 4-5 - Resultados da compactação usando a mola de 20lb

	Hospital Pediátrico	Ladeiras	Zona Industrial
ω (%)	12,422	13,093	12,084
ω (%) *	12,39	11,86	12,28
Variação (%)	0,25	10,40	-1,60
γ_d (kN/m ³)	17,09	18,22	18,23
γ_d (kN/m ³) *	18,60	18,67	18,46
Variação (%)	-8,12	-2,41	-1,25

*- Informações obtidas em Lopes (2014)

Da observação do Quadro 4-5 percebe-se que os valores obtidos estão relativamente próximos aos valores apresentados por Lopes (2014), sendo o erro máximo de 8%.

No caso do solo “Ladeiras”, este apresenta valor de teor em água ligeiramente diferente em relação ao ensaio realizado por Lopes (2014), e tal diferença pode dever-se a algum problema de homogeneização da água no interior da amostra.

Os resultados da compactação usando a mola de 40lb bem como as diferenças comparativamente aos resultados obtidos em Lopes (2014) encontram-se representados no Quadro 4-6.

Quadro 4-6 - Resultados da compactação usando a mola de 40lb

	Hospital Pediátrico	Ladeiras	Zona Industrial
ω (%)	10,907	8,854	7,824
ω (%) *	10,72	10,09	9,593
Variação (%)	1,74	-12,25	-18,44
γ_d (kN/m ³)	17,06	17,95	17,93
γ_d (kN/m ³) *	18,91	19,48	19,09
Variação (%)	-9,78	-7,85	-6,08

*- Informações obtidas em Lopes (2014)

Da observação do Quadro 4-6 conclui-se que, contrariamente ao que acontece na compactação utilizando a mola de 20lb os valores obtidos em comparação aos de Lopes (2014) são ligeiramente diferentes. Este fenómeno pode dever-se a diversos fatores, sendo o que mais influencia o fato de ser realizado por diferentes operadores. Note-se que, o processo, apesar de ter sido mais normalizado no trabalho de Lopes (2014), continua a ser um ensaio manual, dependendo da experiência e técnica do operador. A força que aplicam à mola pode ser ligeiramente diferente. Estas diferenças acumuladas no final do ensaio podem explicar as variações obtidas que, no que se refere ao peso volúmico seco máximo, são em média de 8%.

4.2.2. Comentários acerca dos ensaios de compactação de Harvard

Tal como acontece com os ensaios de compactação de Proctor verificou-se algumas dificuldades durante a compactação nos estados iniciais no ramo seco, bem como onde os teores de água são demasiados elevados.

Durante a compactação com baixos teores em água observou-se que por vezes após a desmoldagem dos provetes e em casos extremos ocorria a quebra do provete.

Nos casos de compactação com excesso de teores em água, não é possível a correta penetração do martelo de compactação, uma vez que quando se faz as pressões de compactação a ponteira do martelo “cola-se” ao solo a compactar. Observa-se também que, para estes teores em água, o solo tem tendência de se acumular junto às paredes do molde, levando à perda de material.

Para aumentar o rigor nos ensaios aconselha-se, tal como nos ensaios de compactação de Proctor a que os ensaios sejam realizados nas mesmas condições quer de temperatura quer de humidade.

4.3. Ensaios de compactação por vibração

O último método de compactação em ambiente laboratorial testado foi a compactação por vibração, abrangendo assim todas as técnicas de compactação possíveis em obra, isto é, a compactação estática, dinâmica e vibratória. Deste modo, será possível realizar comparações entre os vários métodos e comprovar se os dados recolhidos para os diferentes tipos de compactação correspondem aos reais valores de teor em água ótimo dos solos, bem como o peso volúmico seco. Através da realização dos diferentes tipos de compactação, obtém-se os valores dos teores em água ótimos e dos pesos volúmicos secos para cada tipo de compactação, mas o ideal seria que, mesmo com diferentes tipos de compactação, estes valores fossem iguais, uma vez que estes valores são característicos do solo e não do tipo de compactação.

4.3.1. Resultados dos ensaios

Tal como acontece nos outros ensaios de compactação optou-se por realizar dois tipos de compactação, a leve, onde se dividiu a amostra por três camadas compactadas, e a pesada, onde a amostra foi dividida em cinco camadas (ver secção 3.4). Em Caldeira & Brito (2007), apenas são realizados ensaios com três camadas, simulando assim somente a compactação leve. Contudo, o estudo ficaria incompleto sem a compactação pesada, tendo assim optado por ensaiar amostras preparadas com cinco camadas.

As conclusões tiradas acerca dos ensaios da compactação por vibração, quer para a leve quer para a pesada, encontram-se no Quadro 4-7.

Quadro 4-7 - Resultados para a compactação por vibração

		ω (%)	ρ (g/cm ³)	γ_d (kN/m ³)
Compactação Leve	Hospital Pediátrico	12,00	2,00	19,62
	Ladeiras	12,60	1,95	19,13
	Zona Industrial	12,00	1,97	19,33
	Remessa	16,20	1,77	17,36
Compactação Pesada	Hospital Pediátrico	9,40	2,03	19,91
	Ladeiras	8,50	2,11	20,70
	Zona Industrial	7,60	2,11	20,70
	Remessa	12,50	1,72	16,87

4.3.2. Comentários aos resultados obtidos

Inicialmente, experimentou-se fazer a vibração por um tempo de 1 minuto por camada como sugerido por Caldeira & Brito (2007) (ver secção 3.4). Contudo, imediatamente após a compactação da primeira camada da amostra, verificou-se ser demasiado tempo devido ao aumento exagerado de temperatura do solo e, conseqüentemente perda de teor de água, inviabilizando os resultados. Adicionalmente, observou-se também que o solo tem tendência a se acumular junto das paredes do molde, conduzindo uma ainda significativa perda de material, tal como é ilustrado na Figura 4-3.



Figura 4-3 Perda de material devido ao elevado tempo de vibração

Face ao exposto optou-se por reduzir o tempo de vibração para metade, isto é, trinta segundos. Este ajuste no procedimento provou ser mais adequado, com aumentos de temperatura significativamente inferiores aos observados inicialmente. A temperatura varia ligeiramente, mas dentro de valores perfeitamente aceitáveis, tal como se demonstra no Quadro 4-8.

Quadro 4-8 - Diferenças de temperatura durante a compactação por vibração

		Hospital Pediátrico	Ladeiras	Zona Industrial	Remessa
Compactação Leve	Temperatura inicial (°C)	26,0	25,4	25,4	26,2
	Temperatura final (°C)	27,0	27,8	26,2	27,0
	Diferença (°C)	+1	+2,4	+0,8	+0,8
Compactação Pesada	Temperatura inicial (°C)	24,4	23,6	24,6	26,6
	Temperatura final (°C)	34,0	34,6	36,8	36,8
	Diferença (°C)	+9,6	+11	+12,2	+10,2

No Quadro 4-8, observam-se variações de temperatura que vão desde 1°C até 2,4°C, na compactação leve, onde os valores são relativamente baixos e aceitáveis, uma vez que o tempo máximo de vibração é aproximadamente 1min e 30s.

Já na compactação pesada, podem ser observadas variações de temperatura bastante elevadas que variam entre 10°C e 12°C, valores estes que podem influenciar os resultados do teor em água uma vez que existe alguma perda de teor de água por evaporação. Esta elevada variação já era expectada, uma vez que o solo está sujeito a vibração durante 2min e 30s.

Com a finalidade de aumentar o rigor dos ensaios deve-se sempre tentar garantir ao máximo que estes sejam realizados nas mesmas condições.

4.4. Comparação entre os vários métodos de compactação

Para um correto estudo das diferenças entre os diferentes tipos de compactação é fulcral fazer uma comparação entre estes. Nestas secções seguintes, comparam-se os vários métodos dois a dois, tecendo-se, no final conclusões generalizadas para os três meios de compactação.

4.4.1. Comparação entre a compactação de Proctor e Harvard

Para controlar os valores dos teores em água, realizou-se uma comparação entre os teores em água obtidos pela compactação de Proctor e os resultados obtidos na compactação com o compactador miniatura de Harvard. Essa comparação pode ser observada no Quadro 4-9.

Quadro 4-9 - Comparação do teor em água ótimo entre a compactação de Proctor e a compactação de Harvard

		Hospital Pediátrico	Ladeiras	Zona Industrial	Remessa
Compactação Leve	Compactação por Proctor - ω (%)	12,68*	13,56*	12,61*	15,71
	Compactação por Harvard - ω (%)	12,422	13,093	12,084	17,17
	Diferença (%)	+2,08	+3,57	+4,35	-8,50
Compactação Pesada	Compactação por Proctor - ω (%)	9,4*	8,99*	7,88*	10,84
	Compactação por Harvard - ω (%)	10,907	8,854	7,824	15,51
	Diferença (%)	-13,82	+1,54	+0,72	-30,11

*- Informações obtidas em Lopes (2014)

As variações dos teores em água ótimos observadas na compactação leve são bastante aceitáveis, uma vez que não ultrapassam os 10%. Já na compactação pesada existe uma variação de 30% (solo Remessa), valor bastante elevado para o que se esperava. Verificando-se esta divergência unicamente num solo, não é possível concluir se tal se deve ao método de ensaios ou a outra variável, como por exemplo, a inadequabilidade do solo para este tipo de ensaio.

As diferenças do peso volúmico seco entre a compactação de Proctor e a compactação de Harvard estão resumidas no Quadro 4-10.

Quadro 4-10 - Comparação do peso volúmico seco entre a compactação de Proctor e a compactação de Harvard

		Hospital Pediátrico	Ladeiras	Zona Industrial	Remessa
Compactação Leve	Compactação por Proctor - γ_d (kN/m ³)	18,15*	18,34*	17,95*	17,07
	Compactação por Harvard - γ_d (kN/m ³)	17,07	18,25	18,25	16,48
	Diferença (%)	+6,32	+0,49	-1,64	+3,58
Compactação Pesada	Compactação por Proctor - γ_d (kN/m ³)	20,11*	19,91*	20,11*	19,52
	Compactação por Harvard - γ_d (kN/m ³)	17,07	17,95	17,95	17,66
	Diferença (%)	+17,81	+10,92	+12,03	+10,53

*- Informações obtidas em Lopes (2014)

No Quadro 4-10, pode observar-se que as variações do peso volúmico seco entre a compactação de Proctor e a compactação com recurso ao compactador de Harvard, têm valores que variam entre quase zero e os 6% na compactação leve. Contudo, na compactação pesada, obtém-se valores a variar desde 10% até aos 17%. Na compactação leve as diferenças apresentadas não são significativas, uma vez que são inferiores a 10%, já no que toca à compactação pesada, essas diferenças já são mais significativas pois chegam ao valor de 18%.

4.4.2. Comparação entre a compactação de Proctor e a compactação por Vibração

Com a finalidade de controlar os valores dos teores em água, realizou-se uma comparação entre os teores em água obtidos pela compactação de Proctor e os resultados obtidos pela compactação por vibração. Os resultados desta comparação estão resumidos no Quadro 4-12.

Quadro 4-11 - Comparação do teor em água ótimo entre a compactação por vibração e a compactação de Proctor

		Hospital Pediátrico	Ladeiras	Zona Industrial	Remessa
Compactação Leve	Compactação por Vibração - ω (%)	12,00	12,60	12,00	16,20
	Compactação por Proctor - ω (%)	12,68*	13,56*	12,61*	15,71
	Diferença (%)	-5,36	-7,08	-4,84	+3,12
Compactação Pesada	Compactação por Vibração - ω (%)	9,4	8,50	7,60	12,5
	Compactação por Proctor - ω (%)	9,4*	8,99*	7,88*	10,84
	Diferença (%)	0	-5,45	-3,55	+15,31

*- Informações obtidas em Lopes (2014)

Estas baixas variações eram esperadas uma vez que, segundo Caldeira & Brito (2007), o teor em água ótimo da compactação de Proctor é bastante próximo ao teor em água ótimo da compactação por vibração.

No que se refere ao peso volúmico seco máximo os resultados obtidos estão expostos no Quadro 4-12.

Quadro 4-12 - Comparação do peso específico seco entre a compactação por vibração e a compactação de Proctor

		Hospital Pediátrico	Ladeiras	Zona Industrial	Remessa
Compactação Leve	Compactação por Vibração - γ_d (kN/m ³)	19,62	19,13	19,33	17,36
	Compactação por Proctor - γ_d (kN/m ³)	18,15*	18,34*	17,95*	17,07
	Diferença (%)	+8,10	+4,31	+7,69	+1,70
Compactação Pesada	Compactação por Vibração - γ_d (kN/m ³)	19,91	20,70	20,70	16,87
	Compactação por Proctor - γ_d (kN/m ³)	20,11*	19,91*	20,11*	19,52
	Diferença (%)	-0,99	+3,97	+2,93	-13,58

*- Informações obtidas em Lopes (2014)

Do Quadro 4-12, pode observar-se que as variações do peso volúmico seco máximo entre a compactação de Proctor e a compactação por vibração na compactação leve variam entre cerca de 2% e 8%, valores inferiores a 10%, logo bastante positivos na interpretação das diferenças. Já na compactação pesada os valores são ligeiramente superiores, ao variarem entre 1% e 13%, mas visto que não se afastam muito dos 10%, são valores aceitáveis

4.4.3. Comparação entre a compactação por Harvard e a compactação por Vibração

Foi realizada uma comparação entre os teores em água obtidos pela compactação de Harvard e os resultados obtidos pela compactação por vibração, cujos resultados estão resumidos no Quadro 4-13.

Quadro 4-13 - Comparação do teor em água ótimo entre a compactação por vibração e a compactação por Harvard

		Hospital Pediátrico	Ladeiras	Zona Industrial	Remessa
Compactação Leve	Compactação por Vibração - ω (%)	12,00	12,60	12,00	16,20
	Compactação por Harvard - ω (%)	12,42	13,09	12,08	17,17
	Diferença (%)	-3,38	-3,74	-0,66	-5,65
Compactação Pesada	Compactação por Vibração - ω (%)	9,4	8,50	7,60	12,5
	Compactação por Harvard - ω (%)	10,91	8,85	7,82	15,51
	Diferença (%)	-13,84	-3,95	-2,81	-19,41

Ao contrário do que tinha acontecido na secção 4.4.2, as diferenças não eram previsíveis, pois os teores em água ótimos eram diferentes nos dois métodos. As diferenças dos teores em água ótimos na compactação leve não são muito elevadas, uma vez que variam desde os 0,66% até 5,65%, no entanto na compactação pesada observa-se uma maior variação, visto que chega aos 19,41% num dos solos, nomeadamente o “Zona Industrial”.

Tal como acontece na secção anterior, o Quadro 4-14 resume as diferenças observadas entre a compactação por vibração e a compactação por Harvard em termos de peso volúmico seco máximo.

Quadro 4-14 - Comparação do peso específico seco entre a compactação por vibração e a compactação por Harvard

		Hospital Pediátrico	Ladeiras	Zona Industrial	Remessa
Compactação Leve	Compactação por Vibração - γ_d (kN/m ³)	19,62	19,13	19,33	17,36
	Compactação por Harvard - γ_d (kN/m ³)	17,07	18,25	18,25	16,48
	Diferença (%)	+14,94	+4,82	+5,92	+5,34
Compactação Pesada	Compactação por Vibração - γ_d (kN/m ³)	19,91	20,70	20,70	16,87
	Compactação por Harvard - γ_d (kN/m ³)	17,07	17,95	17,95	17,66
	Diferença (%)	+16,64	+15,32	+15,32	-4,47

No Quadro 4-14, pode observar-se que as variações do peso volúmico seco máximo entre a compactação por vibração e a compactação por Harvard variam na compactação leve entre 4,84% e 14,94%, sendo que a diferença só é superior a 10% num dos solos (“Hospital Pediátrico”). Deste modo, não é possível concluir se tal se deve ao método de ensaios ou a outra

variável. Já na compactação pesada só um dos solos (“Remessa”) é que a diferença é inferior a 10%. Nos restantes solos o valor varia entre 15,30% e 16,67%.

As diferenças observadas devem dever-se à constituição mineralógica do próprio solo, tal como se discute na secção 4.4.6.

4.4.4. Comparação entre os 3 métodos de compactação analisados

A comparação com os diferentes métodos de compactação é relevante, pois é a maneira mais concreta de replicar o que acontece realmente em obra.

O Quadro 4-15 faz uma comparação dos resultados obtidos em laboratório dos diferentes métodos de compactação, quer em ter-mos de teor em água ótimo quer em ter-mos de peso volúmico seco.

Quadro 4-15 - Quadro comparativo entre os 3 métodos de compactação analisados

			Proctor	Harvard	Vibração
Compactação Leve	Teor em água (%)	Hospital Pediátrico	12,68	12,42	12,00
		Ladeiras	13,56	13,09	12,60
		Zona Industrial	12,61	12,08	12,00
		Remessa	15,71	17,17	16,20
	Peso volúmico seco (kN/m³)	Hospital Pediátrico	18,15	17,07	19,62
		Ladeiras	18,34	18,25	19,13
		Zona Industrial	17,95	18,25	19,33
		Remessa	17,07	16,48	17,36
Compactação Pesada	Teor em água (%)	Hospital Pediátrico	9,40	10,91	9,40
		Ladeiras	8,99	8,85	8,50
		Zona Industrial	7,88	7,82	7,60
		Remessa	10,84	15,51	12,50
	Peso volúmico seco (kN/m³)	Hospital Pediátrico	20,11	17,07	19,91
		Ladeiras	19,91	17,95	20,7
		Zona Industrial	20,11	17,95	20,7
		Remessa	19,52	17,66	16,87

4.4.5. Efeito da energia de compactação

Tal como se diz na secção 2.1.2.2 a energia de compactação é um dos fatores que influenciam a compactação dos solos.

Para cada tipo de ensaio de compactação (Proctor, Harvard e Vibração) foram realizados dois tipos de compactação: a compactação leve e a compactação pesada. Tal como o nome indica na compactação pesada, o solo está sujeito a uma energia de compactação mais elevada.

4.4.5.1. Peso volúmico seco máximo

Na compactação pelo método de Proctor observa-se que em todos os solos o peso volúmico seco máximo é sempre superior na compactação pesada em relação à compactação leve.

Na compactação pelo método de Harvard, observa-se que os valores da compactação leve e compactação pesada andam muito próximos no que toca ao peso volúmico seco máximo. No

primeiro solo (“Hospital Pediátrico”), os valores são os mesmos. Nos dois solos seguintes (“Ladeiras” e “Zona Industrial”) a compactação leve é ligeiramente superior. Por fim, no solo (“Remessa”), observa-se que o valor do peso volúmico seco máximo na compactação pesada é consideravelmente superior em relação à compactação leve.

Os resultados destes ensaios não eram os esperados. De facto, a utilização de uma energia de compactação maior deve conduzir a pesos volúmicos superiores. No entanto após várias repetições dos ensaios, os resultados foram sempre idênticos. Assim, conclui-se que ou os ensaios foram afetados por um erro sistemático que não foi possível identificar ou durante a compactação com a mola de 40lb, desenvolveu-se algum mecanismo de rotura do qual resulta um solo mais fraco.

Na compactação por vibração observa-se que à exceção de um solo (“Remessa”), o valor do peso volúmico seco máximo na compactação pesada é superior ao obtido na compactação leve. Relativamente ao solo “Remessa”, o valor do peso volúmico seco máximo quer da compactação leve quer da compactação pesada encontram-se muito próximos.

Daqui se conclui que por regra o valor do peso volúmico seco máximo na compactação pesada é superior ao valor do peso volúmico seco máximo da compactação leve, tendo sido contudo identificadas algumas incongruências.

4.4.5.2. Teor em água ótimo

No que toca ao teor em água ótimo pode concluir-se que se verifica em todos os solos que este é superior na compactação leve em relação à compactação pesada.

4.4.6. Efeito do teor de finos

Na compactação pesada, tal não acontece, constatando-se que o valor do peso volúmico seco máximo nos solos “Hospital Pediátrico” e “Remessa” é obtido através da compactação de Proctor. Já nos solos “Ladeiras” e “Zona Industrial” verifica-se este máximo na compactação por vibração.

A granulometria dos solos é um dos fatores que influencia a compactação, tal como referido na secção 2.1.2.2.

No caso da compactação leve observa-se que é na compactação por vibração que se obtém o peso volúmico seco máximo em todos os solos e isto pode dever-se à facilidade deste tipo de compactação em atingir uma profundidade relativa através da frequência e amplitude que é aplicada à máquina vibratória (Moreira, 2008), daí ser na compactação leve por vibração que os solos todos atingem o valor máximo.

Na compactação pesada, e tal como já foi referido na secção 2.1.2.2 o solo que possui um peso volúmico seco máximo maior, é o que apresenta um teor em água ótimo inferior. Também é referido que o tipo de solo deve corresponder a estas características é um solo que contenha uma maior percentagem de grossos (Moreira, 2008). No entanto no caso em estudo não é isso que acontece pois o solo que apresenta as características referidas no princípio é um solo com uma elevada percentagem em finos (“Zona Industrial”). Em contrapartida é um solo que não

apresenta uma granulometria extensa, sendo mal graduado, podendo ser esta uma das razões para apresentar o peso volúmico seco máximo mais elevado comparativamente com os outros. Já no caso do solo “Ladeiras” é um solo com uma elevada percentagem em grossos, daí a possuir também um elevado peso volúmico seco máximo. A razão para ser na compactação por vibração que estes solos atingem o peso volúmico seco máximo deve-se ao facto de neste tipo de compactação ser aplicada uma carga vibrante ao solo, onde essa vibração propaga-se pelo material, aproximando as partículas devido a estas entrarem em movimento (Moreira, 2008). Já nos solos (Hospital Pediátrico e Remessa) onde o peso volúmico seco máximo é superior no ensaio de Proctor deve-se ao fato do solo estar bem graduado bem como à presença de finos, existindo assim umas ligações entre partículas muito fortes, e assim deve-se aplicar uma compactação por impacto para quebrar essas ligações para assim conduzir a estrutura do solo ao estado a que corresponde o menor índice de vazios (Moreira, 2008).

4.5. Conclusões

De tudo o que foi referido na secção 4 importa referir que o método de compactação mais eficiente depende dos três fatores apresentados na secção 2.1.2.2. No Quadro 4-16 é descrito o tipo de equipamento utilizado consoante o tipo de solo que vai ser estudado.

Quadro 4-16 – Seleção de equipamentos dependendo do tipo de solo

Solos coesivos	Misturas argila+silte+areia	Solos incoerentes	Pedras e calhaus
Pés-de-carneiro estático			
Pés-de-carneiro vibratório			
	Liso vibratório		
	Pneus leve		
Pneus de grande diâmetro pesado			
		Liso estático 3 rolo	
Combinados			
			Grade ou placas

5. Resultados dos Ensaios laboratoriais de caracterização do comportamento mecânico

O estudo do comportamento mecânico dos solos em análise assenta na realização dos ensaios de CBR, que é referido na secção 3.5 e o ensaio UCS (compressão simples não confinado), apresentado na secção 3.6.

5.1. Ensaio do Índice de Suporte Califórnia (CBR)

Tal como foi referido na secção 3.5 e seguindo a especificação 198-1967 do LNEC, o ensaio de CBR consiste na medição da força necessária para que um pistão normalizado penetre no solo até uma determinada profundidade, a uma velocidade constante previamente definida. O CBR é a força requerida para o pistão penetrar até essa profundidade, expressa em percentagem de força necessária para o mesmo pistão penetrar, até à mesma profundidade e com a mesma velocidade num provete normalizado. Em regra usam-se as penetrações de 2,5mm e 5,0mm.

5.1.1. Resultados dos ensaios

Realizaram-se ensaios logo após a compactação (CBR imediato, “CBR_i”) e ensaios onde o solo, após compactação, ficou 96 horas em embebição. Na construção dos gráficos foi necessário em alguns casos recorrer a uma correção gráfica, na medida para desprezar possíveis erros que possam ter ocorrido (ver secção 3.5.3).

5.1.1.1. Determinação do CBR imediato

Do ensaio CBR imediatamente após a compactação resultaram os gráficos presentes na Figura 5-1.

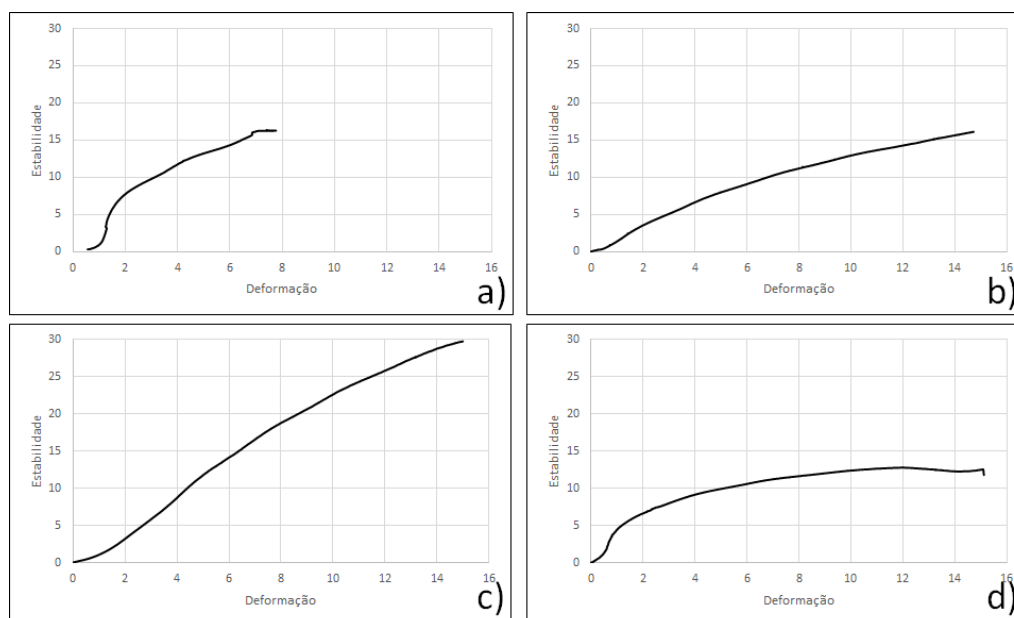


Figura 5-1 – Curvas referentes ao ensaio de CBR imediato para os solos: a) Hospital Pediátrico; b) Ladeiras; c) Zona Industrial; d) Remessa

A partir da análise da Figura 5-1 – Curvas referentes ao ensaio de CBR imediato para os solos: a) Hospital Pediátrico; b) Ladeiras; c) Zona Industrial; d) Remessa, retiram-se os dados referentes às penetrações de 2,5mm e 5,0mm resultantes do ensaio CBR. Note-se que, da determinação dos valores apresentados no Quadro 5-1 houve necessidade de corrigir a curva representadas na Figura 5-1 a), como se pode ver no Anexo E.

Quadro 5-1 – CBR imediato

		Força de penetração (kN)	Força de penetração (kgf)	CBR _i corrigido (%)
Hospital Pediátrico	X=2,5	9,8	999,322	73,75
	X=5,0	13,75	1402,110	68,97
Ladeiras	X=2,5	4,35	443,577	32,74
	X=5,0	7,98	813,734	40,03
Zona Industrial	X=2,5	4,53	461,931	34,09
	X=5,0	11,8	1203,265	59,19
Remessa	X=2,5	7,43	757,649	55,92
	X=5,0	9,93	1012,578	49,81

5.1.1.2. Determinação do CBR

Do ensaio CBR após 96 horas em embebição resultaram os gráficos presentes na Figura 5-2.

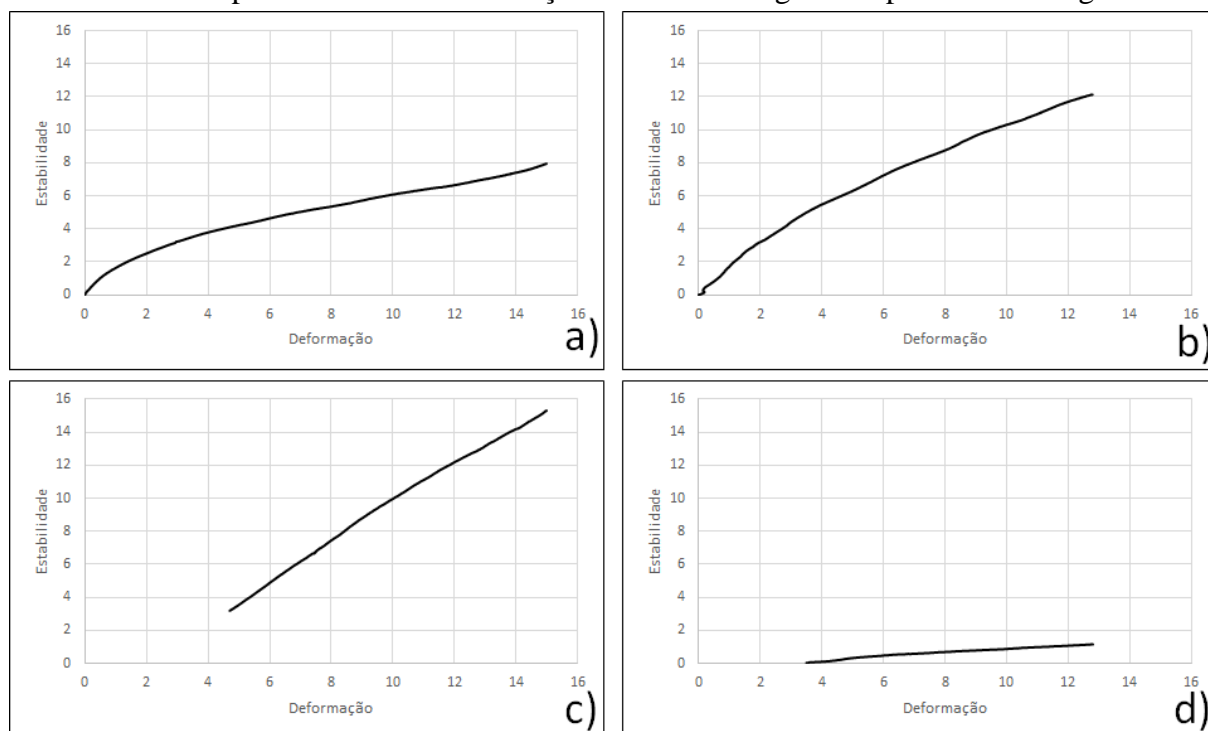


Figura 5-2 - Curvas referentes ao ensaio de CBR para os solos: a) Hospital Pediátrico; b) Ladeiras; c) Zona Industrial; d) Remessa

À semelhança do efetuado após os ensaios de CBR imediato, da análise da Figura 5-2, retiram-se os dados referentes às penetrações de 2,5mm e 5,0mm resultantes do ensaio CBR. Note-se

que, da determinação dos valores no Anexo F, houve também necessidade de corrigir a curva do solo “Zona Industrial” e a curva do solo “Remessa”, como é representado no Anexo F.

Quadro 5-2 – CBR

		Força de penetração (kN)	Força de penetração (kgf)	CBR corrigido (%)
Hospital Pediátrico	X=2,5	2,87	292,659	21,60
	X=5,0	4,22	430,320	21,17
Ladeiras	X=2,5	3,76	383,413	28,30
	X=5,0	6,3	642,421	31,60
Zona Industrial	X=2,5	3,19	325,289	24,01
	X=5,0	6,42	654,658	32,20
Remessa	X=2,5	0,49	49,966	3,69
	X=5,0	0,73	74,439	3,66

5.1.2. Análise e comentários aos resultados dos ensaios de CBR

Na secção 5.1.1, são apresentados os gráficos resultantes dos ensaios de CBR bem como os valores da força de penetração para os deslocamentos de 2,5 e 5,0 mm. Contudo, tratando-se de um índice de resistência, o CBR dos solos apenas fica definido após a sua comparação com a força de penetração de provetes padrão. No Quadro 5-3 resumem-se os índices de CBR e CBR_i para os vários solos.

Quadro 5-3 – Comparação dos valores de CBR e CBR_i

		Força de penetração (kN)	Força de penetração (kgf)	CBR_i corrigido (%)	Força de penetração (kN)	Força de penetração (kgf)	CBR corrigido (%)
Hospital Pediátrico	X=2,5	9,8	999,322	73,75	2,87	292,659	21,60
	X=5,0	13,75	1402,110	68,97	4,22	430,320	21,17
Ladeiras	X=2,5	4,35	443,577	32,74	3,76	383,413	28,30
	X=5,0	7,98	813,734	40,03	6,3	642,421	31,60
Zona Industrial	X=2,5	4,53	461,931	34,09	3,19	325,289	24,01
	X=5,0	11,8	1203,265	59,19	6,42	654,658	32,20
Remessa	X=2,5	7,43	757,649	55,92	0,49	49,966	3,69
	X=5,0	9,93	1012,578	49,81	0,73	74,439	3,66

A primeira conclusão que resulta da análise do Quadro 5-3 é que o CBR_i é, como era expectável, mais elevado que o valor de CBR.

Para os solos “Hospital Pediátrico” e “Remessa”, e tal como sugere a especificação do LNEC E198-1967, o valor de CBR para a penetração de 2,5mm é superior ao valor de CBR para a penetração de 5,0mm. Este comportamento verifica-se quer se esteja a fazer referencia ao ensaio imediatamente após a compactação ou após 96 horas em embebição. Já os solos “Ladeiras” e “Zona Industrial” apresentam, tanto para o ensaio imediato como para o ensaio

após as 96 horas em embebição, valores superiores para 5,0mm de penetração aos referentes a 2,5mm de penetração.

Conforme é indicado na especificação E198-1967 do LNEC, os ensaios foram repetidos e, como estes resultados foram novamente verificados, os valores de CBR e CBR_i para estes dois são referentes a penetrações de 5,0mm.

Após consulta do MACOPAV (1995) comparou-se os valores de CBR com a classificação de solos realizada na secção 3.2.3.

Na classificação de solos inicial, os solos “Hospital Pediátrico”, “Ladeiras” e “Zona Industrial” estavam inseridos na classe S3. Contudo, face aos resultados do ensaio CBR, em termos de comportamento mecânico, estes solos apresentam características típicas da classe S4, devendo esta prevalecer. Já no solo “Remessa”, a classificação inicial era que pertencia à classe S2, no entanto a correspondência tendo em conta o CBR remete para uma classe superior, nomeadamente a S1.

Da observação do Quadro 5-4 correlaciona-se os valores característicos do índice de CBR dependente da grupo/sub-grupo a que pertence, referido por Sabogal (2009).

Quadro 5-4 – Valores de CBR característicos segundo Sabogal (2009)

Símbolo AASHTO	Valor característico CBR (%)
A-7-6	1-5
A-7-5	2-8
A-6	5-15
A-5	8-16
A-4	10-20
A-3	15-35
A-2-7	10-20
A-2-6	10-25
A-2-5	15-30
A-2-4	20-40
A-1-b	35-60
A-1-a	60-80

O solo “Hospital Pediátrico” possui uma classificação segundo a especificação E 240-1970 pertencente ao grupo A-4, e após o cálculo do CBR e com o auxílio do Quadro 5-4 resulta que pode pertencer ao grupo A-3, ao A-2-6, ao A-2-5 ou ao A-2-4. Assim sendo, a resposta mecânica do solo prevê uma classificação superior a da resultante da identificação física.

O solo “Zona Industrial” possui uma classificação segundo a especificação E 240-1970 pertencente ao grupo A-4, e após o cálculo do CBR e com o auxílio do Quadro 5-4 resulta que pode pertencer ao grupo A-3 ou ao grupo A-2-4. Neste caso a conclusão também é a mesma do que para o solo anterior, pois pela forma mecânica conclui-se que o solo é mais resistente do que a identificação física prevê.

O solo “Ladeiras” possui uma classificação segundo a especificação E 240-1970 pertencente ao grupo A-2-6, e após o cálculo do CBR e com o auxílio do Quadro 5-4 resulta que pode pertencer ao grupo A-3 ou ao grupo A-2-4. Neste solo, o grupo resultante da identificação física inseriu o solo entre os dois grupos que a classificação mecânica prevê.

O solo “Remessa” possui uma classificação segundo a especificação E 240-1970 pertencente ao grupo A-6, e após o cálculo do CBR e com o auxílio do Quadro 5-4 resulta que pode pertencer ao grupo A-7-6 ou ao grupo A-7-5. Já neste solo, a classificação mecânica prevê uma classe de resistência inferior à que a identificação física propõe.

Embora os resultados do grupo a que pertencem os solos não sejam os mesmos calculados de diferentes formas, conclui-se que não se afastam muito, uma vez que varia geralmente uma classe.

No Quadro 5-5 resume-se a relação entre o valor de CBR obtido com o valor característico de CBR, e de tal observação resulta que nos solos “Hospital Pediátrico” e “Remessa” os valores obtidos encontram-se próximos dos respetivos valores característicos. Já para os outros dois solos “Zona Industrial” e “Ladeiras” os valores obtidos afastam-se ligeiramente dos valores característicos.

Quadro 5-5 – Correlação do CBR obtido com o valor característico do CBR

Designação	Índice de grupo	Grupo/sub-grupo (E-240)	Valor do CBR (%)	Grupo/sub-grupo (CBR)
Hospital Pediátrico	1 *	A-4 *	21,60	A-3 / A-2-6 / A-2-5 / A-2-4
Zona Industrial	5 *	A-4 *	32,20	A-3 / A-2-4
Ladeiras	1 *	A-2-6 *	31,60	A-3 / A-2-4
Remessa	4	A-6	3,69	A-7-6 / A-7-5

*- Informações obtidas em Lopes (2014)

5.2. Ensaio de compressão simples não confinada (UCS)

O ensaio de compressão simples pretende, como é referido na secção 3.6, estudar o comportamento dos solos à compressão. Neste ensaio realizou-se a compressão dos solos previamente compactados pelos 3 métodos referidos anteriormente (compactação de Proctor, presente na secção 3.3.1; compactação de Harvard, presente na secção 3.3.2 e a compactação por Vibração, que se encontra na secção 3.4).

5.2.1. Resultados dos ensaios

Dos ensaios UCS realizados resultam os gráficos de tensão-deformação característicos dos solos em estudo consoante o método de compactação efetuado bem como o tipo de energia (leve e pesada). Estes resultados são apresentados nas secções seguintes, estando agrupados consoante o tipo de compactação.

5.2.1.1. Compactação de Proctor

Após a compactação dos provetes e sua devida preparação para o ensaio de corte (ver secções 3.6.3.1 e 3.6.3.2), procedeu-se ao ensaio de compressão simples, dos quais resultam os gráficos referentes às amostras preparadas por compactação leve e pesada representados respetivamente, na Figura 5-3 e Figura 5-4.

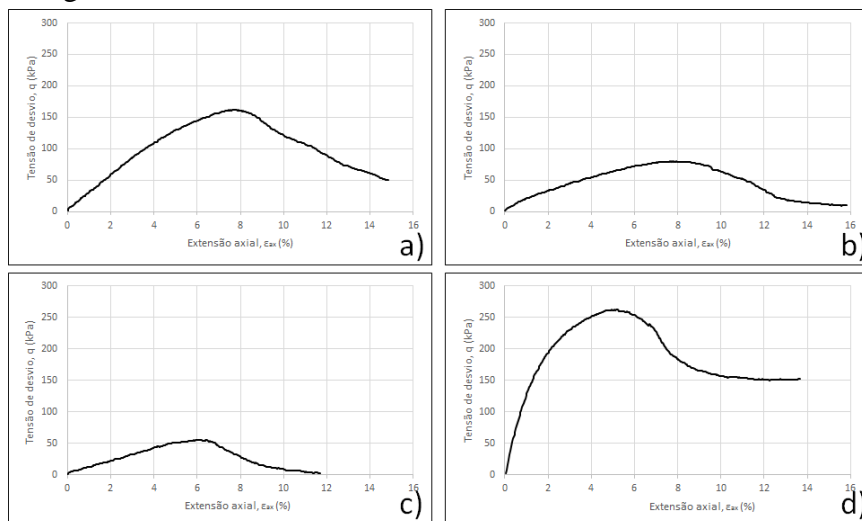


Figura 5-3 - Curvas de tensão-deformação das amostras preparadas por compactação de Proctor Leve: a) Hospital Pediátrico; b) Ladeiras; c) Zona Industrial; d) Remessa

A primeira conclusão que resulta da análise da Figura 5-3 é que todos os solos apresentam uma resistência de pico, sendo que para os solos “Ladeiras” e “Remessa” também foi possível obter a resistência residual dos mesmos. Os valores obtidos para as resistências de pico e residuais estão resumidos no Quadro 5-6.

Quadro 5-6 – Resistências dos solos para a compactação de Proctor Leve

	Resistência de pico, q_u (kPa)	Extensão axial, ϵ_{ax} (%)	Resistência residual, q_u (kPa)	Extensão axial, ϵ_{ax} (%)
Hospital Pediátrico	161,30	7,63		
Ladeiras	80,65	7,92	10,52	15,21
Zona Industrial	54,93	5,83		
Remessa	262,97	5,09	151,93	13,64

No Quadro 5-7 são apresentados os módulos de deformabilidade tangente para cada solo na compactação leve de Proctor.

Quadro 5-7 – Módulo de deformabilidade na compactação leve de Proctor

	E_{50} (kPa)
Hospital Pediátrico	27,86
Ladeiras	15,01
Zona Industrial	10,24
Remessa	119,19

Da observação do Quadro 5-7 conclui-se que o solo que possui o maior módulo de deformabilidade secante é o solo “Remessa” e o que apresenta menor módulo de deformabilidade secante é o “Zona Industrial”. Relacionando o Quadro 5-6 com o Quadro 5-7 conclui-se que, como seria expectável, o solo Remessa” é o que possui não só a resistência mais elevada bem como é o que possui o maior módulo de deformabilidade scante. É visível também a situação para o solo com menor resistência de pico, solo “Zona Industrial” que este solo é também o que possui um menor módulo de deformabilidade secante.

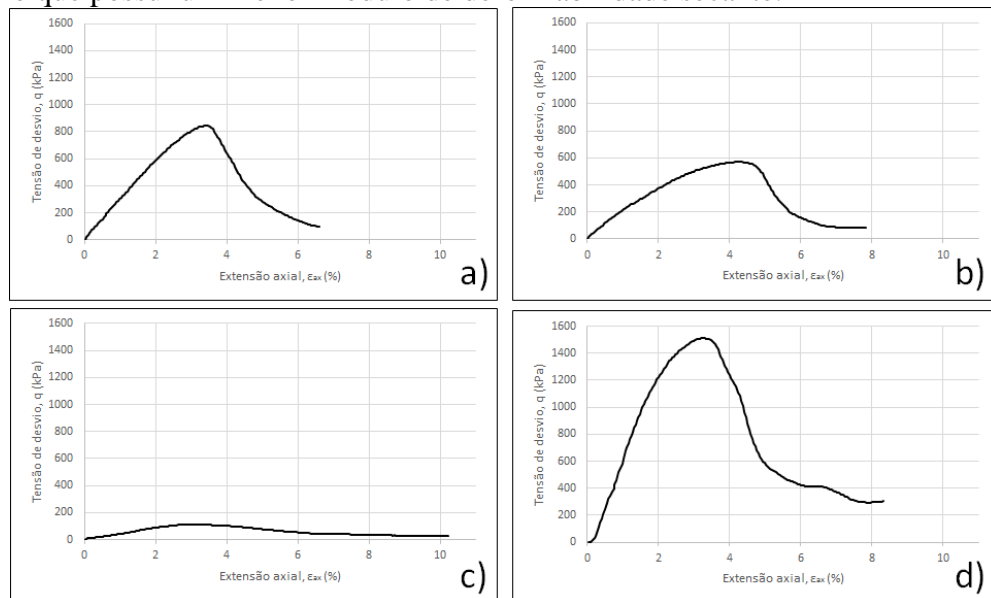


Figura 5-4 - Curvas de tensão-deformação das amostras preparadas por compactação de Proctor Pesado:
a) Hospital Pediátrico; b) Ladeiras; c) Zona Industrial; d) Remessa

O que resulta da análise da Figura 5-4 é que todos os solos apresentam uma resistência de pico, sendo que para os solos “Ladeiras”, “Zona Industrial” e “Remessa” é possível também obter a resistência residual dos mesmos. Os valores obtidos para as resistências de pico e residuais estão resumidos no Quadro 5-8.

Quadro 5-8 - Resistências dos solos para a compactação de Proctor Pesado

	Resistência de pico, q_u (kPa)	Extensão axial, ϵ_{ax} (%)	Resistência residual, q_u (kPa)	Extensão axial, ϵ_{ax} (%)
Hospital Pediátrico	843,83	3,39		
Ladeiras	570,35	4,30	81,81	7,51
Zona Industrial	113,37	2,99	28,05	10,03
Remessa	1513,47	3,26	299,19	8,12

Os valores dos módulos de deformabilidade tangente para cada solo na compactação pesada de Proctor encontram-se no Quadro 5-9.

Quadro 5-9 - Módulo de deformabilidade na compactação pesada de Proctor

	E_{50} (kPa)
Hospital Pediátrico	287,69
Ladeiras	185,14
Zona Industrial	44,40
Remessa	621,57

No Quadro 5-9 é visível que o solo que possui o maior módulo de deformabilidade secante é o solo “Remessa” e o que apresenta menor módulo de deformabilidade secante é o “Zona Industrial”.

Da observação do Quadro 5-8 e do Quadro 5-9, e tal como era expectável, conclui-se que o solo que possui uma maior resistência de pico é o solo que possui também o maior módulo de deformabilidade, que é o solo “Remessa”. Já o solo que possui uma menor resistência de pico, é o mesmo solo que tem o menor módulo de deformabilidade, isto é, o solo “Zona Industrial”.

5.2.1.2. Compactação de Harvard

Nesta secção apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão simples referentes aos provetes preparados utilizando o compactador miniatura de Harvard, seguindo o procedimento descrito na secção 3.3.2. Relembra-se que os provetes não necessitaram de preparação prévia antes do ensaio. De facto, foram as dimensões destes provetes que condicionaram a geometria das amostras ensaiadas no triaxial. Os resultados referentes ao uso das molas de 20lb e 40lb estão ilustradas na Figura 5-5 e na Figura 5-6 respetivamente.

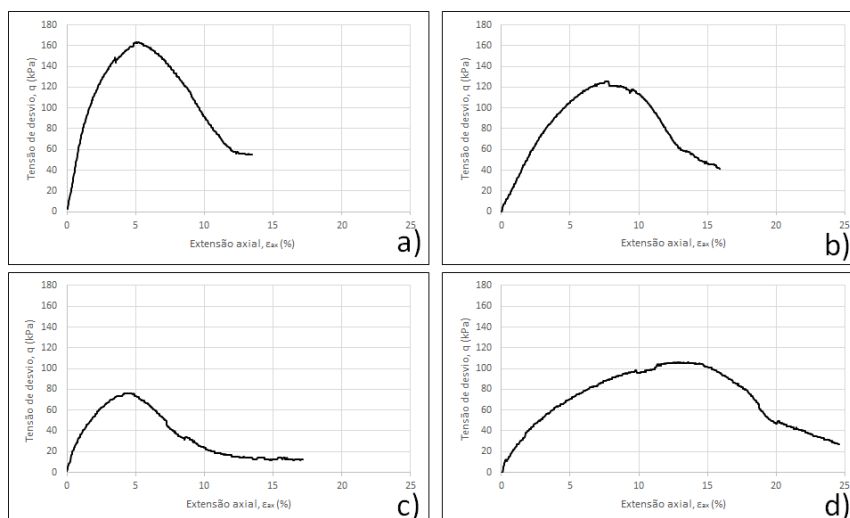


Figura 5-5 - Curvas de tensão-deformação das amostras preparadas por compactação de Harvard com mola de 20lb: a) Hospital Pediátrico; b) Ladeiras; c) Zona Industrial; d) Remessa

Da análise da Figura 5-5 resulta que todos os solos apresentam uma resistência de pico, sendo que para o solo “Zona Industrial” é possível também obter a resistência residual. Os valores obtidos para as resistências de pico e residuais encontram-se no Quadro 5-10.

Quadro 5-10 - Resistências dos solos para a compactação de Harvard com 20lb

	Resistência de pico, q_u (kPa)	Extensão axial, ϵ_{ax} (%)	Resistência residual, q_u (kPa)	Extensão axial, ϵ_{ax} (%)
Hospital Pediátrico	163,64	4,98		
Ladeiras	125,06	7,72		
Zona Industrial	75,97	4,70	12,86	16,56
Remessa	106,36	12,89		

No Quadro 5-11 são apresentados os valores do módulo de deformabilidade secante para a compactação de Harvard com a mola de 20lb.

Quadro 5-11 - Módulo de deformabilidade na compactação de Harvard com mola de 20lb

	E_{50} (kPa)
Hospital Pediátrico	66,28
Ladeiras	26,05
Zona Industrial	32,73
Remessa	17,93

A partir do Quadro 5-11 é visível que o solo que possui um maior módulo de deformabilidade secante é o solo “Hospital Pediátrico” e o que possui um menor módulo de deformabilidade é o solo “Remessa”.

Com o Quadro 5-10 e o Quadro 5-11 é possível afirmar, tal como era expectável que o solo que possui uma maior resistência de pico é o mesmo que tem o maior módulo de deformabilidade secante. No entanto o solo que apresenta a resistência de pico mais baixa não é o mesmo que possui o módulo de deformabilidade secante mais baixa. Tal acontecimento pode ter ocorrido devido a alguma deficiência durante o ensaio. Esta incongruência de resultados requer a realização de mais ensaios que não foram possíveis realizar.

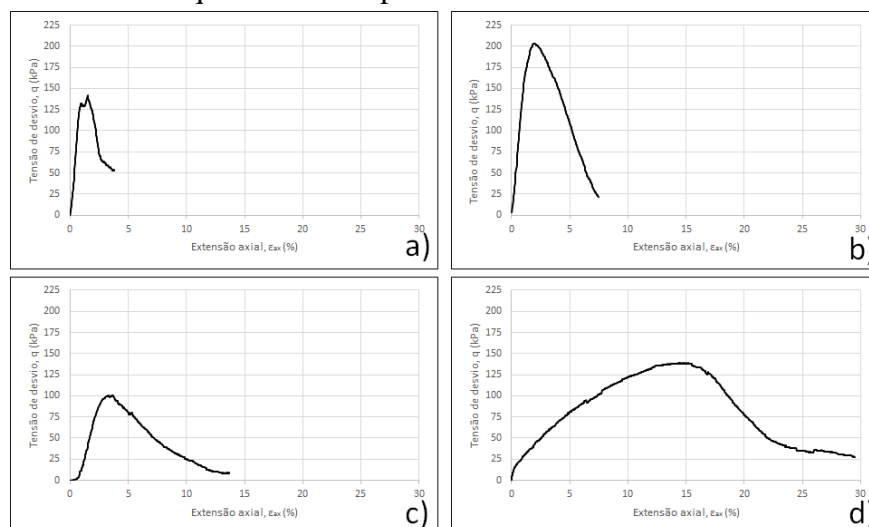


Figura 5-6 - Curvas de tensão-deformação das amostras preparadas por compactação de Harvard com mola de 40lb: a) Hospital Pediátrico; b) Ladeiras; c) Zona Industrial; d) Remessa

Na Figura 5-6 é possível concluir que todos os solos apresentam uma resistência de pico, sendo que é possível obter a resistência residual para o solo “Zona Industrial”. Os valores obtidos para as resistências de pico e residuais estão no Quadro 5-12.

Quadro 5-12 - Resistências dos solos para a compactação de Harvard com 40lb

	Resistência de pico, q_u (kPa)	Extensão axial, ϵ_{ax} (%)	Resistência residual, q_u (kPa)	Extensão axial, ϵ_{ax} (%)
Hospital Pediátrico	141,42	1,51		
Ladeiras	203,38	2,05		
Zona Industrial	100,51	3,21	8,18	13,21
Remessa	139,09	14,45		

Os valores do módulo de deformabilidade secante para a compactação de Harvard com a mola de 40lb são apresentados no Quadro 5-13.

Quadro 5-13 - Módulo de deformabilidade na compactação de Harvard com mola de 40lb

	E_{50} (kPa)
Hospital Pediátrico	151,44
Ladeiras	156,16
Zona Industrial	31,13
Remessa	17,01

No Quadro 5-13 nota-se que o solo que possui o maior módulo de deformabilidade secante é o “Ladeiras”, e o que possui o menor módulo de deformabilidade é o “Remessa”.

Tendo o Quadro 5-12 e o Quadro 5-13 em vista, observa-se tal como expectável que o solo que possui maior resistência de pico é o mesmo que possui o maior módulo de deformabilidade secante, que é o “Ladeiras”. Já no que toca ao solo que possui a menor resistência de pico não coincide com o solo que possui menor módulo de deformabilidade secante. Novamente, esta incongruência de resultados requer a realização de mais ensaios que não foram possíveis realizar.

5.2.1.3. Compactação por Vibração

Por fim, apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão simples obtidos sobre as amostras preparadas por compactação por vibração, tal como se descreve na secção 3.4. À semelhança do referido para as amostras preparadas por compactação de Proctor, houve necessidade de moldar os provetes até ser atingida a geometria pretendida. As curvas tensão-deformação das amostras preparadas por vibração leve e pesada estão ilustradas, respetivamente na Figura 5-7 e na Figura 5-8.

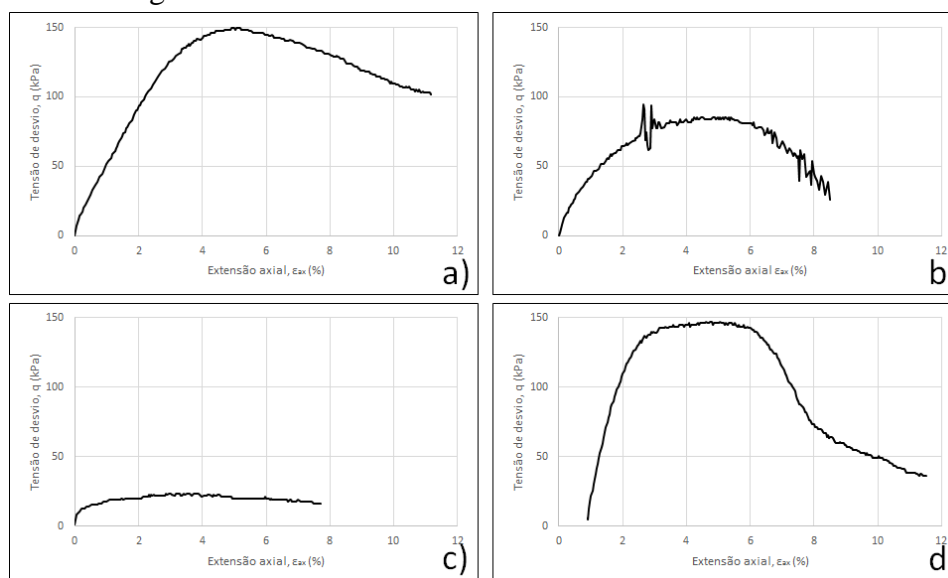


Figura 5-7 - Curvas de tensão-deformação das amostras preparadas por compactação por vibração Leve: a) Hospital Pediátrico; b) Ladeiras; c) Zona Industrial; d) Remessa

A resultante da análise da Figura 5-7 é que todos os solos apresentam uma resistência de pico, não foi possível observar nitidamente a resistência residual de qualquer solo. Os valores obtidos para as resistências de pico estão resumidos no Quadro 5-14.

Quadro 5-14 - Resistências dos solos para a compactação por vibração Leve

	Resistência de pico, q_u (kPa)	Extensão axial, ε_{ax} (%)
Hospital Pediátrico	149,60	4,99
Ladeiras	94,67	2,64
Zona Industrial	23,38	3,40
Remessa	147,26	4,63

Para observar os módulos de deformabilidade na compactação leve por vibração recorre-se ao Quadro 5-15.

Quadro 5-15 - Módulo de deformabilidade na compactação leve por vibração

	E_{50} (kPa)
Hospital Pediátrico	48,40
Ladeiras	40,54
Zona Industrial	34,41
Remessa	50,26

Perante o Quadro 5-15 observa-se que o solo que possui o maior módulo de deformabilidade secante é o solo “Remessa”, e o que possui menor módulo de deformabilidade secante é o solo “Zona Industrial”.

Com o Quadro 5-14 e o Quadro 5-15 conclui-se tal como esperado que o solo que possui menor resistência de pico é o mesmo solo que possui menor módulo de deformabilidade, “Zona Industrial”. No que toca ao solo que possui maior resistência de pico, não é o mesmo que possui o maior módulo de deformabilidade. Esta incongruência de resultados requer também a realização de mais ensaios que não foram possíveis realizar.

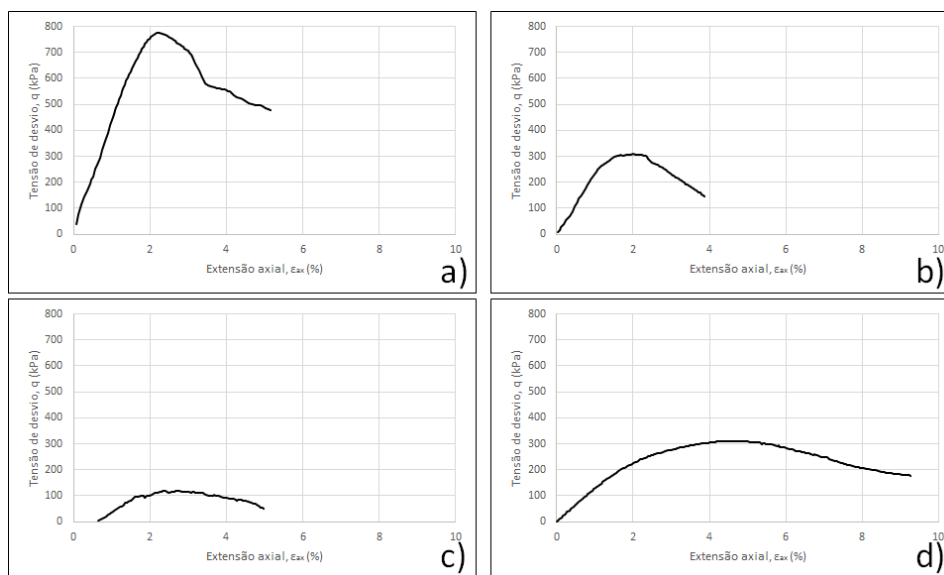


Figura 5-8 - Curvas de tensão-deformação das amostras preparadas por compactação por vibração Pesada: a) Hospital Pediátrico; b) Ladeiras; c) Zona Industrial; d) Remessa

Na Figura 5-8 observa-se que todos os solos apresentam uma resistência de pico, não sendo possível observar nitidamente a resistência residual de qualquer solo. Os valores obtidos para as resistências de pico estão resumidos no Quadro 5-16.

Quadro 5-16 - Resistências dos solos para a compactação por vibração Pesada

	Resistência de pico, q_u (kPa)	Extensão axial, ϵ_{ax} (%)
Hospital Pediátrico	775,68	2,26
Ladeiras	308,46	2,00
Zona Industrial	120,38	2,70
Remessa	310,89	4,63

No Quadro 5-17 são apresentados os módulos de deformabilidade tangente para a compactação pesada por vibração.

Quadro 5-17 - Módulo de deformabilidade na compactação pesada por vibração

	E_{50} (kPa)
Hospital Pediátrico	441,75
Ladeiras	235,48
Zona Industrial	48,78
Remessa	126,13

Com o auxílio do Quadro 5-17 conclui-se que o solo que possui maior módulo de deformabilidade secante é o solo “Hospital Pediátrico”, e o solo que possui menor módulo de deformabilidade secante é o solo “Zona Industrial”.

Recorrendo ao Quadro 5-16 e ao Quadro 5-17 observa-se que o solo que possui maior resistência de pico é o mesmo solo que possui maior módulo de deformabilidade secante, isto é, o “Hospital Pediátrico”. Também se conclui que o solo que possui menor resistência de pico é o mesmo que tem o menor módulo de deformabilidade secante, isto é, “Zona Industrial”.

5.2.2. Análise e comentários aos resultados dos ensaios UCS

Analisando em conjunto todos os resultados apresentados na secção anterior, facilmente se conclui que, com exceção da amostra solo “Hospital Pediátrico” preparada por compactação de Harvard, a tensão de desvio de pico referente à compactação pesada é superior à compactação leve. Este resultado era expectável pois, como se prova na secção 2.1.2.20, quanto maior a energia de compactação, maior peso volúmico seco máximo. Consequentemente, o volume de vazios na amostra é menor, exibindo as amostras menor deformabilidade e maior resistência. Através da interpretação do Quadro 5-6, do Quadro 5-10 e do Quadro 5-14 observa-se também que os valores da compactação leve, qualquer que seja o método rondam todos a mesma ordem de grandeza, não havendo grandes discrepâncias. Já na compactação pesada, como mostra o Quadro 5-8, o Quadro 5-12 e o Quadro 5-16 observa-se valores relativamente baixos na compactação de Harvard comparando com os outros dois métodos de compactação.

5.2.2.1. Energia de compactação

A energia de compactação que se aplica aos solos é um fator determinante na resistência que esses solos irá ter quando solicitado por determinada carga. Para tal compara-se a resistência de pico entre a compactação leve e a compactação pesada com a finalidade de se observar as diferenças existentes na resistência de pico bem como a extensão axial para a qual ocorre.

Quadro 5-18 – Comparação entre os ensaios de Proctor

	Compactação leve		Compactação pesada	
	Resistência de pico, q_u (kPa)	Extensão axial, ϵ_{ax} (%)	Resistência de pico, q_u (kPa)	Extensão axial, ϵ_{ax} (%)
Hospital Pediátrico	161,30	7,63	843,83	3,39
Ladeiras	80,65	7,92	570,35	4,30
Zona Industrial	54,93	5,83	113,37	2,99
Remessa	262,97	5,09	1513,47	3,26

Da observação do Quadro 5-18 conclui-se que a resistência de pico é superior na compactação pesada, ocorrendo para um nível de extensão ao ensaio de compactação leve. Tal era expectado

pois, quanto mais compacto estiver o solo, mais rígida será a resposta e menor a sua deformabilidade.

Quadro 5-19 - Comparação entre os ensaios de Harvard

	Compactação leve		Compactação pesada	
	Resistência de pico, q_u (kPa)	Extensão axial, ϵ_{ax} (%)	Resistência de pico, q_u (kPa)	Extensão axial, ϵ_{ax} (%)
Hospital Pediátrico	163,64	4,98	141,42	1,51
Ladeiras	125,06	7,72	203,38	2,05
Zona Industrial	75,97	4,70	100,51	3,21
Remessa	106,36	12,89	139,09	14,45

Da observação do Quadro 5-19 conclui-se que nos solos “Ladeiras”, “Zona Industrial” e “Remessa” o valor da resistência de pico é superior na compactação pesada, e onde, nos primeiros dois solos a deformação onde ocorre o pico é superior na compactação leve. Esta conclusão não era expectável uma vez que a resistência na compactação pesada deveria ser mais elevada, uma das prováveis razões para tal acontecer poderá dever-se à incapacidade do solo de suportar o ensaio com a mola de 40lb. Poderá ter-se levado o solo à rotura durante a compactação deste modo, onde a mola poderá ser muito rígida, levando o solo à rotura por punçoamento.

Já no solo “Remessa” a deformação onde ocorre o pico é a esperada, ou seja, é a superior na compactação pesada.

Quadro 5-20 - Comparação entre os ensaios de Vibração

	Compactação leve		Compactação pesada	
	Resistência de pico, q_u (kPa)	Extensão axial, ϵ_{ax} (%)	Resistência de pico, q_u (kPa)	Extensão axial, ϵ_{ax} (%)
Hospital Pediátrico	149,60	4,99	775,68	2,26
Ladeiras	94,67	2,64	308,46	2,00
Zona Industrial	23,38	3,40	120,38	2,70
Remessa	147,26	4,63	310,89	4,63

Da observação do Quadro 5-20 conclui-se que os valores da resistência de pico são sempre superiores na compactação pesada. A deformação onde ocorre a resistência de pico é, como expectável inferior na compactação pesada nos três primeiros solos (“Hospital Pediátrico”, “Ladeiras” e “Zona Industrial”), já no quarto solo (“Remessa”) a deformação onde ocorre o pico é igual.

A análise aqui efetuada, juntamente com a identificação das incongruências nos resultados dos ensaios de compactação com a mola de 20lb e de 40lb levam a concluir que a utilização da mola de 40lb provoca a rotura do solo durante o ensaio de compactação. As diferenças entre resistências de pico obtidas em amostras resultantes das compactações leve e pesada nos ensaios de Proctor e por vibração são significativamente superiores às identificadas no ensaio de Harvard. Adicionalmente, apenas se verifica a existência de uma resistência de pico “leve” superior à “pesada” no ensaio de Harvard. Estas duas observações, juntamente com o facto de os pesos volúmicos resultantes da compactação com a mola de 20lb serem superiores aos resultantes dos ensaios com a mola de 40lb, são indicadores da ocorrência de um fenómeno de rotura do solo durante o ensaio.

De facto, ocorrendo rotura, o solo já não responderá às solicitações impostas com as suas características de pico, mas sim residuais. Assim, compreende-se que tanto a estrutura obtida após compactação com a mola de 40lb bem como a resistência apurada nos ensaios UCS sejam idênticas ou mesmo inferiores aos resultados da preparação de amostras com a mola de 20lb. Nesta situação, estar-se-ia a comparar resultados de pico referentes à mola de 20lb e resultados residuais referentes à mola de 40lb. Por fim, atendendo ao mecanismo de compactação com o mini compactador de Harvard, supõe-se que a rotura do solo ocorra por punçoamento.

5.2.2.2. Influência da granulometria

Como já foi referido em capítulos anteriores a granulometria do solo influencia a sua resistência bem como a percentagem de grossos e finos. Sabe-se que um solo com granulometria extensa leva a uma boa resistência, no entanto solos com uma maior percentagem de grossos são mais resistentes. E solos que contêm uma elevada percentagem de finos tendem a ser fracos pois são mais plásticos.

Quadro 5-21 – Comparação dos ensaios de compactação leve

	Passados no Pen.200 (%)	Peso volúmico seco máximo, γ_d (kN/m^3)	Compactação leve		
			Proctor Resistência de pico, q_u (kPa)	Harvard Resistência de pico, q_u (kPa)	Vibração Resistência de pico, q_u (kPa)
Hospital Pediátrico	38	18,12	161,30	163,64	149,60
Ladeiras	31	18,32	80,65	125,06	94,67
Zona Industrial	61	17,93	54,93	75,97	23,38
Remessa	51	17,03	262,97	106,36	147,26

Da observação do Quadro 5-21 observa-se que o solo que tem uma maior percentagem de finos (61%) é o “Zona Industrial”, sendo também este o solo cuja interpretação do gráfico de granulometria é “mal graduado”. Já o solo que contém uma menor percentagem de finos é o solo “Ladeiras” (31%). Os restantes dois solos “Hospital Pediátrico” contém uma percentagem de finos igual a 38% e o solo “Remessa” uma percentagem de finos igual a 51%.

No Quadro 5-21 é visível que o solo que possui menor resistência em qualquer dos ensaios de compactação realizados é o “Zona Industrial”, tal resultados já era esperado, uma vez que este solo é o solo com o maior teor em finos.

Na compactação de Harvard e na compactação por vibração os resultados quanto ao solo mais resistente, embora não seja o esperado, que era o solo “Ladeiras”, resultou o solo “Hospital Pediátrico”, tendo este também a segunda taxa mais baixa em termos de percentagem em finos. Já no caso do ensaio de Proctor observa-se que o solo que possui uma maior resistência é o solo “Remessa”, resultado este que não era o esperado uma vez que este solo apresenta uma elevada percentagem de finos (51%). Estas diferenças de valores pode ter resultado de uma deficiente compactação.

Quadro 5-22 - Comparação dos ensaios de compactação pesada

	Compactação pesada				
	Passados no Pen.200 (%)	Peso volúmico seco máximo, γ_d (kN/m^3)	Proctor Resistência de pico, q_u (kPa)	Harvard Resistência de pico, q_u (kPa)	Vibração Resistência de pico, q_u (kPa)
Hospital Pediátrico	38	20,12	843,83	141,42	775,68
Ladeiras	31	19,93	570,35	203,38	308,46
Zona Industrial	61	20,09	113,37	100,51	120,38
Remessa	51	19,51	1513,47	139,09	310,89

Da observação do Quadro 5-22 as conclusões quanto à percentagem de finos é igual às da compactação leve devido a esta característica ser própria dos solos, sendo o solo “Zona Industrial” o solo com o maior teor em finos (61%), e o solo com menor percentagem em finos o solo “Ladeiras” (31%). Já os restantes dois solos “Hospital Pediátrico” contém uma percentagem de finos de 38% e o solo “Remessa” uma percentagem de finos de 51%.

No Quadro 5-22 observa-se tal como o que acontece na compactação leve que o solo com menor resistência é o solo “Zona Industrial” solo esse que é o que contém maior teor em finos. Na compactação de Harvard o resultado do solo mais resistente é o que se espera, uma vez que é o solo com menor teor em finos, o “Ladeiras”. Já na compactação de Proctor o solo mais resistente é o solo “Remessa”, tal como aconteceu na compactação leve. E na compactação por vibração o solo mais resistente é o mesmo solo da compactação leve, isto é, o “Hospital Pediátrico”.

O facto de haver estas diferenças pode ocorrer devido a algum tipo de compactação deficiente, embora os ensaios tivessem sido repetidos, os resultados eram todos muito aproximados.

As observações anteriores são elucidativas quanto à complexidade da relação existente entre a resposta mecânica dos solos, a sua granulometria e a estrutura mais compacta passível de ser atingida com ensaios de compactação. Os quatro solos estudados não permitem concluir de forma inequívoca qual o tipo de compactação mais apropriado ao tipo de solo em apreço. Tais

conclusões requerem a realização de uma campanha de caracterização mais vasta e com mais solos.

5.3. Correlações entre ensaios de compactação e resistência

Nesta secção apresentam-se os resultados da aplicação das formulações semi-empíricas enunciadas na secção 2.3.

5.3.1. Estimativa do CBR

Tal como é referido na secção 2.3 é possível estimar o valor de CBR através da correlação de valores obtidos nos ensaios de compactação bem como da plasticidade do solo. No Quadro 5-23 são apresentados os valores de CBR obtidos pela formulação semi-empírica expressa na Equação 2-1.

Quadro 5-23 – Estimativa do CBR (%) pela Equação 2-1

		CBR (%) estimado
Proctor Pesado	Hospital Pediátrico	32,11
	Ladeiras	32,47
	Zona Industrial	32,19
	Remessa	30,71
Harvard 40lb	Hospital Pediátrico	27,45
	Ladeiras	29,75
	Zona Industrial	29,17
	Remessa	26,88
Vibração Pesada	Hospital Pediátrico	31,83
	Ladeiras	33,71
	Zona Industrial	33,09
	Remessa	26,55

Da observação do Quadro 5-23 é possível concluir que nos três métodos de compactação pesada estes tendem a apresentar valores idênticos, o que indica uma boa relação. Contudo, o solo “Remessa” não segue esta tendência. Nos restantes três solos, observa-se uma boa relação entre o CBR obtido laboratorialmente e o CBR obtido por formulação semi-empírica.

5.3.2. Estimativa do q_u

Como foi referido na secção 2.3 é possível estimar o valor de q_u através da correlação de valores resultantes dos ensaios preliminares (plasticidade) e dos ensaios de compactação. No Quadro 5-24 são apresentados os valores de q_u obtidos pela formulação semi-empírica expressa na Equação 2-2.

Quadro 5-24 – Estimativa do q_u (kPa) pela Equação 2-2

		q_u (kPa) estimado
Proctor Leve	Hospital Pediátrico	246,13
	Ladeiras	284,81
	Zona Industrial	356,41
	Remessa	196,99
Proctor Pesado	Hospital Pediátrico	339,79
	Ladeiras	352,09
	Zona Industrial	581,45
	Remessa	238,98
Harvard 20lb	Hospital Pediátrico	253,17
	Ladeiras	291,49
	Zona Industrial	379,47
	Remessa	184,91
Harvard 40lb	Hospital Pediátrico	295,35
	Ladeiras	354,23
	Zona Industrial	584,59
	Remessa	198,66
Vibração Leve	Hospital Pediátrico	264,67
	Ladeiras	298,51
	Zona Industrial	383
	Remessa	192,91
Vibração Pesada	Hospital Pediátrico	339,79
	Ladeiras	359,61
	Zona Industrial	596,13
	Remessa	224,38

Na Figura 5-9 são apresentados gráficos que relacionam os valores de q_u obtidos laboratorialmente como os valores de q_u obtidos pela correlação de outros fatores.

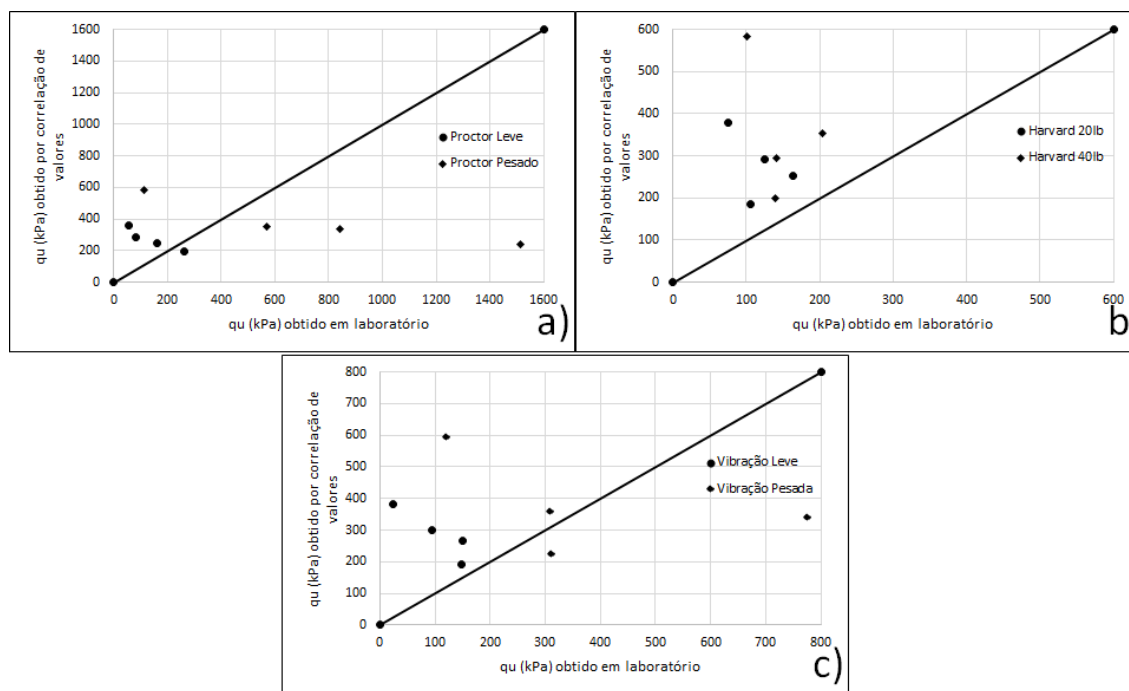


Figura 5-9 - Gráfico com a relação entre q_u obtido em laboratório com q_u obtido através de correlação de valores: a) Proctor; b) Harvard e c) Vibração

Da observação da Figura 5-9 onde são relacionados os valores de q_u obtidos por dois métodos distintos é possível concluir que, contrariamente ao que tinha ocorrido no caso do CBR os valores obtidos não são muito semelhantes. No entanto, embora a relação não seja a ideal esta solução semi-empírica é, das várias disponíveis na bibliografia, a que mais se aproxima dos resultados obtidos em laboratório.

5.3.3. Relação q_u e CBR

Na secção 2.3 foi referido que é possível estimar o valor de q_u através da correlação de valores resultantes dos ensaios de CBR (ver Equação 2-3). No Quadro 5-25 são apresentados os valores de q_u obtidos pela formulação semi-empírica apresentada na secção 2.3.

Quadro 5-25 - q_u (kPa) obtido através do ensaio de CBR

Solo	CBR (%) obtido laboratorialmente	q_u (kPa) obtido pelo ensaio de CBR
Hospital Pediátrico	21,6	224,08
Ladeiras	31,6	313,20
Zona Industrial	32,20	318,42
Remessa	3,69	47,32

Na Figura 5-10 apresenta-se um gráfico que relaciona os valores de q_u obtidos laboratorialmente com os valores de q_u obtidos por correlação com os valores obtidos no ensaio de CBR.

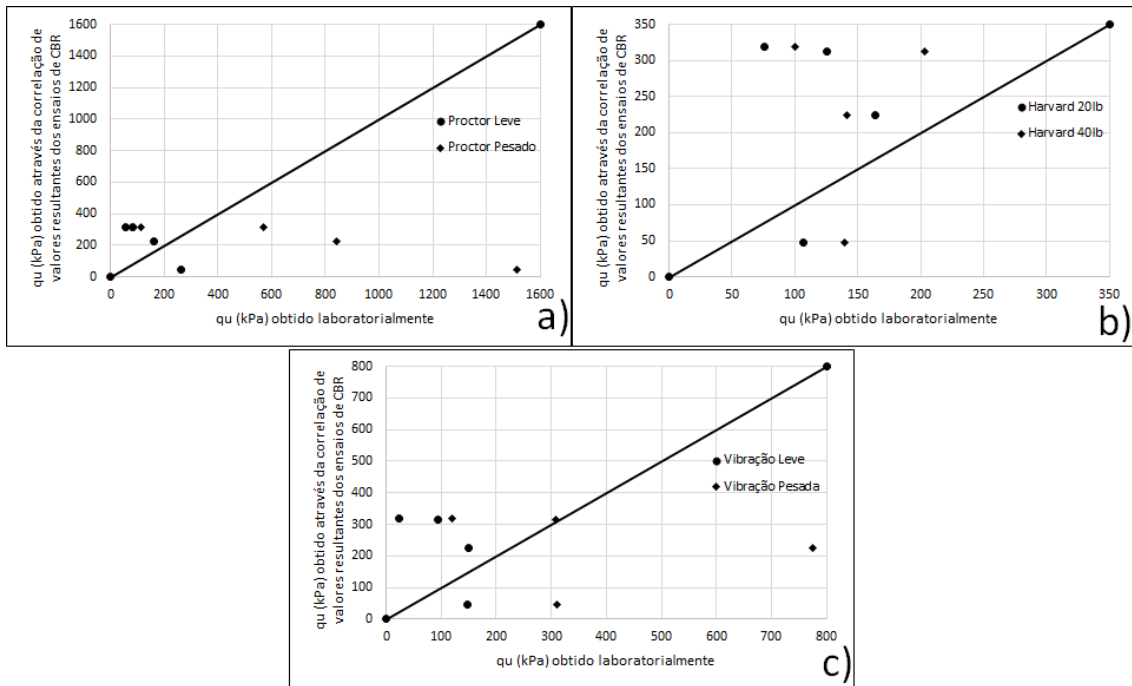


Figura 5-10 - Gráfico com a relação entre q_u obtido em laboratório com q_u obtido através de correlação de valores resultantes do ensaio de CBR: a) Proctor; b) Harvard e c) Vibração

A partir da observação da Figura 5-10 e dos resultados do Quadro 5-25 onde são relacionados os valores de q_u obtidos laboratorialmente e obtidos através dos valores de CBR conclui-se que os valores não são muito semelhantes. No entanto tal como referido na correlação anterior, embora a relação não seja a ideal esta solução semi-empírica é a que mais se aproxima dos resultados obtidos em laboratório.

5.4. Conclusões

Neste capítulo pode concluir-se em primeiro lugar que como seria expectável o valor do índice de CBR é inferior ao índice de CBR_i .

Neste capítulo também se compara os valores da classificação dos solos obtida através das características físicas do solo com o auxílio da especificação E240-1970 do LNEC com os valores da classificação dos solos através do valor do CBR, denotando que embora as classificações não coincidam, os resultados são muito semelhantes.

Na análise dos resultados do ensaio UCS surgiram diversas conclusões, sendo a mais interessante e significativa relativa à compactação de Harvard com a mola de 40lb onde se observa que aquando a utilização da mola de 40lb existe rotura do solo durante o ensaio de compactação.

Também se observa que as relações propostas entre ensaios de compactação e resistência, nomeadamente o CBR, sob a forma de formações semi-empíricas são assaz satisfatórias. O mesmo não se pode dizer relativamente à estimativa da resistência q_u e da relação entre este valor e o CBR.

6. Conclusões e Propostas de Investigação Futura

Na presente dissertação, tendo por base quatro solos recolhidos em zonas distintas do país e com características diferentes analisam-se e comparam-se três tipos de compactação em laboratório. As várias observações obtidas quer nos ensaios de compactação quer nos ensaios de resistência são apresentadas nos vários capítulos que compõem este documento escrito. Com este último capítulo, pretende-se apresentar, de forma sucinta, as principais conclusões da investigação levada a cabo bem como, face aos resultados obtidos, apresentar novas propostas de investigação para futuros trabalhos.

6.1. Conclusão

Ao longo desta dissertação foram realizados diversos ensaios laboratoriais. Inicialmente realizam-se ensaios de identificação com a finalidade de classificar os solos atendendo às suas características físicas.

Realizaram-se ensaios de compactação por três métodos distintos (Proctor, Harvard e Vibração), tendo sido efetuadas as variantes leve e pesada destes ensaios. Destes ensaios resultaram os respetivos teores em água ótimos e os pesos volúmicos secos máximos para os vários solos estudados. Observou-se que em todos os métodos de compactação o teor em água era mais elevado na compactação leve do que na compactação pesada, tal como era expectável. No que toca ao peso volúmico seco, a regra é ser maior na compactação pesada, no entanto existem algumas exceções, que podem ter ocorrido devido a algum problema no processo laboratorial.

No que se refere ao peso volúmico seco, observa-se na compactação leve que os valores máximos em todos os solos são obtidos na compactação por vibração. Na compactação pesada observa-se que o valor do peso volúmico seco é superior na compactação de Proctor nos solos “Hospital Pediátrico” e “Remessa” já nos outros dois solos “Ladeiras” e “Zona Industrial” esse valor é superior na compactação por vibração, o facto de estes valores não pertencerem todos ao mesmo tipo de compactação pode dever-se à composição granulométrica dos solos, no entanto para o número de solos analisados não é possível apresentar nenhum padrão comportamental. Verifica-se também que os valores obtidos são superiores na compactação pesada. As exceções identificadas são atribuídas à ocorrência de rotura por punçoamento do solo aquando da compactação do mesmo com o compactador miniatura de Harvard.

De facto, após a realização dos ensaios UCS verifica-se que, em três dos quatro ensaios, as resistências de pico referentes às amostras preparadas por compactação pesada são inferiores à resistência de pico de amostras preparadas por compactação leve. Adicionalmente, as diferenças nos valores de pico para os dois tipos de amostras são muitíssimo inferiores às observadas nos outros dois tipos de compactação (Proctor e por Vibração). Assim, conclui-se que a energia de compactação transmitida ao solo aquando da utilização da mola de 40lb no ensaio de compactação de Harvard é tal que o solo sofre rotura por corte durante a compactação.

Nos restantes ensaios UCS, os resultados obtidos são coerentes e indicam que na compactação pesada é observado que a resistência de pico máxima é atingida no ensaio de Proctor em três solos, sendo que no solo “Zona Industrial” este máximo é obtido no ensaio de Vibração. O mesmo tipo de raciocínio pode ser aplicado aos resultados da compactação leve. A única exceção a este comportamento ocorre para o solo “Ladeiras”, em que o ensaio de vibração leve permite a preparação de uma amostra aparentemente mais resistente.

Relativamente aos ensaios de CBR observa-se que o solo possui maior CBR é o solo “Zona Industrial” e o que possui menor CBR é o solo “Remessa”, para o número de solos analisados não é possível apresentar nenhum padrão comportamental, contudo pensa-se que esta diferença se deva à diferente composição granulométrica dos solos.

As correlações efetuadas entre os ensaios de compactação e de resistência mostraram-se bastante interessantes, principalmente na solução semi-empírica para obtenção do CBR através da plasticidade do solo e dos resultados dos ensaios de compactação, bem como a sua relação com o CBR, os resultados alcançados não são tão encorajadores. Note-se também que as estimativas nesta última correlação tendem a ser excessivas, devendo por isso ser utilizadas com muita cautela.

6.2. Trabalhos futuros

O estudo presente identificou algumas dúvidas que não foram possíveis esclarecer por não se enquadrarem no âmbito da presente dissertação ou por o extenso plano de ensaios não permitir, no tempo disponível, efetuar mais ensaios. Com vista à confirmação de algumas suposições aqui apresentadas propõem-se três temas para investigação futura:

- 1) Averiguar a ocorrência de rotura com a mola de 40lb na compactação de Harvard. Com este tema propõe-se que sejam analisados vários solos de granulometria bem distintas de modo a concluir se, de facto, a utilização desta mola provoca rotura durante a compactação.
- 2) Em consonância com o tema anterior, propõe-se que seja pensado um novo procedimento para a compactação “pesada” de Harvard ou através da alteração da mola de 37,5lb ou de alguma alteração no procedimento como, por exemplo, um número mais reduzido de camadas.
- 3) Explorar as formulações semi-empíricas, propondo algumas correlações mais adequadas a solos portugueses ou internacionais de referencia. Neste trabalho, após uma extensa pesquisa bibliográfica, as principais formulações semi-empíricas seriam aplicadas a vários solos cujas características estão devidamente estudadas e publicadas (solos moles do baixo Mondego, solo residual do Porto, argilas de Londres ou argilas azuis de Boston).

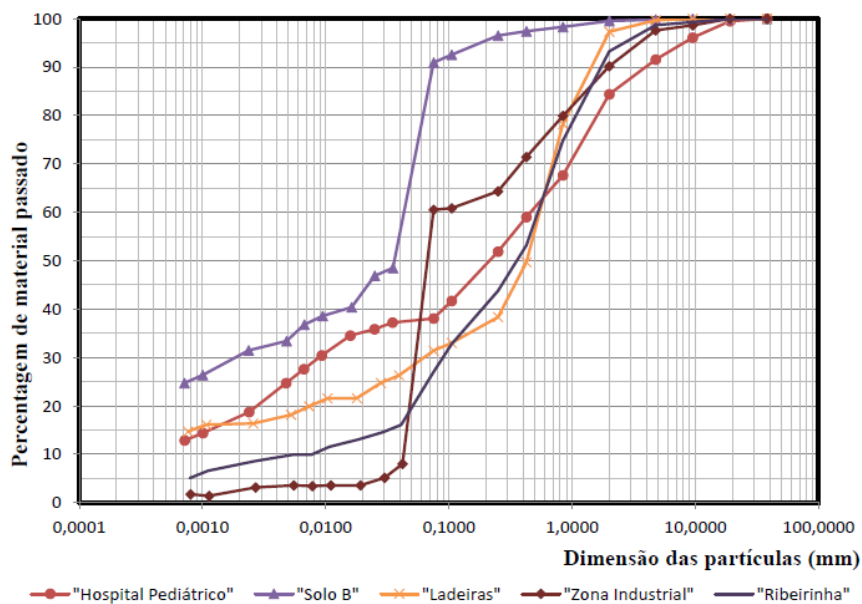
7. Referências bibliográficas

- Alves, M. F. (2003). *ABC da Metrologia Industrial*. Sebenta. DEE-ISEP. Porto
- Al-Kahdaar, R. M., & Al-Ameri, A. F. I. (2010). *Correlations Between Physical and Mechanical Properties of Al-Ammarah Soil in Messan Governorate*. Journal of Engineering, Vol 16, Issue 4, ISSN: 17264073. Bagdad
- Barbim, D. (2013). <https://prezi.com/mlyihtsegnml/modulo-de-young/>. Paraná
- Caldeira, L., & Brito, A. (2007). *Controlo da compactação de misturas de solo-enrocamento da barragem de Odelouca através de ensaios de vibração*. Geotecnia, nº 109. Lisboa
- Carvalho, A. L. (2011). *Análise do Efeito da Estabilização Mecânica e Física em Matrizes de Terra*. Relatório Final de Iniciação Científica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro
- Cristelo, N. (2001). *Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal*. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Guimarães
- Cruz, F. (2012) – *Mecânica dos Solos*. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Coimbra
- Cunha, R. A. F. (2014). *Contribuição para a Metodologia de Estudo de Melhoria de um Solo com Cimento no Âmbito de uma Obra Rodoviária*. Tese de Mestrado, Universidade Fernando Pessoa Faculdade de Ciências e Tecnologia. Porto
- Faria, P. A. G. (2005). *Propriedades composicionais e geotécnicas de solos argilosos em obras rodoviárias*. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro. Aveiro
- Head, K. H. (1994). *Manual of Soil Laboratory Testing volume 2: Permeability, shear strength and compressibility tests*. For ELE International Limited. Nova Iorque
- Lopes, S. (2014). *Validação do compactador de Harvard no estudo da compactação de solos*. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra
- Melo, F. G., & Ferreira, H. N. (1981). *Controle da construção de obras de terra*. Seminário 249 (pp. 9-12). Lisboa: Laboratório Nacional da Engenharia Civil
- Moreira, C. M. (2008). *Noções Gerais sobre Compactação*. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Coimbra
- Paige-Green, P., & Du Plessis, L. (2009). *The use and Interpretation of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) Test*. Version 2, CSIR, Issue Date: 09-09. Tshwane
- Pires, P. (2013). *Controle de compactação de solos e índice suporte Califórnia*. Brasil
- Prietto, P. D. M. (1996). *Estudo do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre
- Sabogal, F. S. (2009). *Curso Básico de diseño de pavimentos*. Colômbia
- Santos, J. A. (2008). *Compactação: Elementos Teóricos*. Instituto Superior Técnico. Lisboa
- Talukdar, D. K. (2014). *A Study of Correlation Between California Bearing Ratio (CBR) Value With Other Properties of Soil*. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 4, Issue 1. Assam

- Teles, J. M. N. P. C. (2013). *Comportamento Mecânico do Solo Mole do Baixo Mondego Quimicamente Estabilizado Com Adição de Fibras Metálicas*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra. Coimbra
- Velloso, D. A., & Lopes, F. R. (2002). *Fundações*. Editora Oficina de Textos. Rio de Janeiro
- Vilar, O. M., & Bueno, B. S. (2004). *Mecânica dos Solos Volume II*. Departamento de Geotecnia- Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos
- 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. Philadelphia
- ASTM (2006). *Practice for Classification of soils for engineering purposes: Unified soil Classification System*. D-2487-06, American Society for Testing and Materials, USA
- ASTM (2013). *Test Method For Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. D-2166-00, American Society for Testing and Materials. USA
- E (1966). *Análise Granulométrica*, E-196, Especificação do LNEC para solos: Laboratório Nacional da Engenharia Civil. Portugal
- E (1966). *Ensaio de Compactação*, E-197, Especificação do LNEC para solos: Laboratório Nacional da Engenharia Civil. Portugal
- E (1970): *Classificação para fins rodoviários*, E-240, Especificação do LNEC para solos: Laboratório Nacional da Engenharia Civil. Portugal
- E (1967). *Determinação do CBR*, E-198, Especificação do LNEC para solos: Laboratório Nacional da Engenharia Civil. Portugal
- E (1966). *Preparação por via seca das amostras para ensaios de identificação*, E 195, Especificação do LNEC para solos: Laboratório Nacional da Engenharia Civil. Portugal
- NP (1965). *Determinação da densidade das partículas*, NP-83, Norma Portuguesa e Especificação do LNEC para solos: Laboratório Nacional da Engenharia Civil. Portugal
- NP (1965). *Determinação do teor em água*, NP-84, Norma Portuguesa e Especificação do LNEC para solos: Laboratório Nacional da Engenharia Civil. Portugal
- NP (1969). *Determinação dos Limites de Consistência*, NP-143, Norma Portuguesa e Especificação do LNEC para solos: Laboratório Nacional da Engenharia Civil. Portugal
- TMN (2008). *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. Nevada
- BS (1990), *“British Standard Methods of test for Soils for Civil Engineering Purposes: Part 4. Compaction-related test*, BS1377, British Standard. UK
- Lai, J (2004) – *Advanced Geotechnical Laboratory, Unconfined Compression Test*, Department of Construction Engineering Chaoyang University of Technology. Chaoyang
- MACOPAV (1995). *Manual de concepção de pavimentos para a rede rodoviária nacional*,

8. Anexos

Anexo A – Curvas granulométricas para solos em estudo (Lopes, 2014)



Anexo B – Procedimento MCH-ISEC/2014 (Lopes, 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.

→ 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 porção 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.

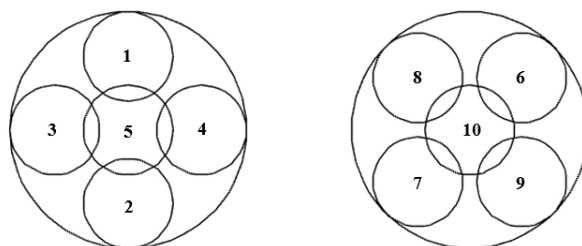
→ Procedimento de compactação

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 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. Por coincidência, cada porção geralmente corresponde a duas ou três colheres de chá, como referido por Wilson no seu procedimento.

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



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.

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, extraíndo o material excedente.

Pesa-se e regista-se o peso do molde e solo compactado no seu interior.

A amostra de solo deve ser extraída do interior do molde, intacta, usando para o efeito a mesma estrutura de desmonte de amostras. Uma vez extraído o provete deve ser dividido em cinco frações.

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. Seguidamente, são introduzidas numa estufa durante pelo menos 12 horas a 110°C.

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.

Anexo C – Especificações técnicas da prensa triaxial

Especificações Técnicas:

- Força máxima: 50KN
- Gama velocidade: 0-100mm/min
- Curso prato compressão: 100mm
- Diâmetro prato compressão: 158mm
- Interface PC: USB
- Distância livre entre colunas: 380mm
- Distância livre vertical: máx.1000mm (entre prato e travessa superior)
- Peso: 95Kg
- Dimensões: 475 x 360 x 1430mm (l x p x a).
- Alimentação elétrica: 90-240VAC, 50/60Hz, monofásica

Conforme com normas:

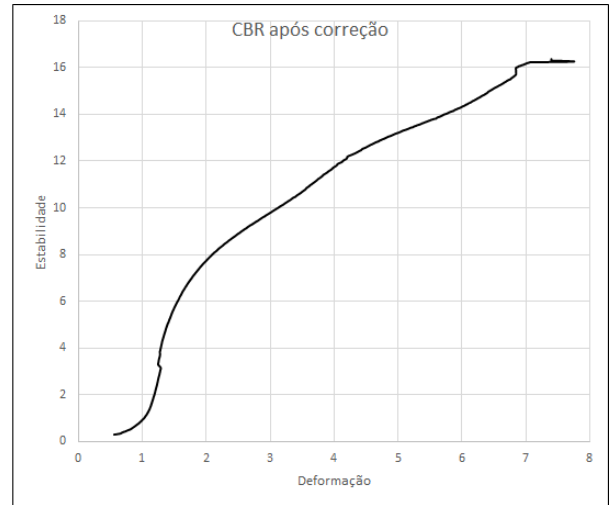
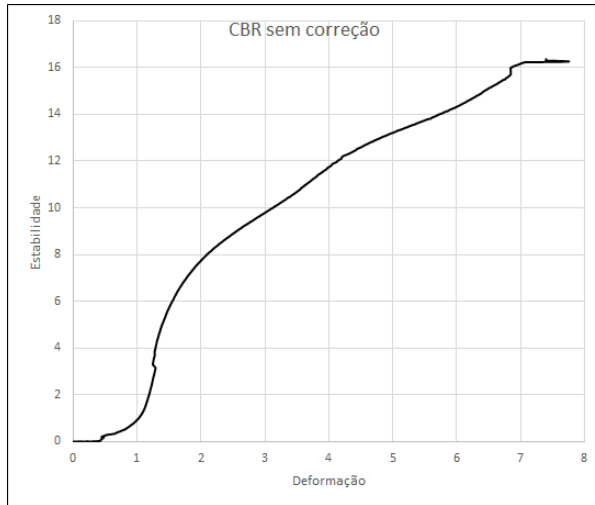
- BS 1377-7:1990
- BS 1377-8:1990
- ASTM D2850-03a(2007)
- ASTM D4767-11
- ISO/TS 17892-9:2004
- ISO/TS 17892-8:2004
- NF P 94-070

Anexo D – Valores da compactação de Proctor (Lopes, 2014)

	Compactação Leve		Compactação Pesada		
	W _{opt}	γ _d , máx (g/cm ³)	W _{opt}	γ _d , máx (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	

	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

Anexo E – Correção do gráfico do CBR_i para o solo “Hospital Pediátrico”



Anexo F – Correção do gráfico do CBR para os solos: a) Zona Industrial; b) Remessa

