



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Controlo da compactação com recurso a gamadensímetro –
Caso de estudo: ETAR de Castelo Branco**

Ana Teresa Azevedo Ferreira da Silva



**POLITÉCNICO
DO PORTO**



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Controlo da compactação com recurso a gamadensímetro –
Caso de estudo: ETAR de Castelo Branco**

Ana Teresa Azevedo Ferreira da Silva

N.º 1080578

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

Júri

Presidente

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor José Augusto de Abreu Peixoto Fernandes

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutora Maria Eugénia Oliveira Lopes

Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestre Nuno Miguel Silva Azevedo Pinto

Laboratório Central Mota-Engil SA

*A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG)** foi defendida em prova pública, pela Licenciada Ana Teresa Azevedo Ferreira da Silva, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em 11 de Novembro de 2013 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **16 (dezasseis) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta.*

O Director do MEGG/ISEP

Dedico esta tese aos meus pais por todo o apoio incondicional que sempre me deram. Tudo isto só foi possível graças a vocês.

Agradecimentos

Fica aqui um agradecimento a todos que, ao longo do meu percurso académico, contribuíram para o sucesso da minha formação. Assim, o meu agradecimento:

- ❖ Ao Prof. Doutor José Augusto Fernandes, que acompanhou e orientou cientificamente o desenvolvimento deste manuscrito. Durante o meu percurso académico no ISEP, tanto me ensinou e aconselhou, sempre com sabedoria e boa disposição.
- ❖ Ao Prof. Doutor Helder I. Chaminé, por todo o apoio e disponibilidade que sempre manifestou.
- ❖ À Mota-Engil, Engenharia e Construção, S. A., que permitiu a realização deste trabalho, no âmbito do estágio, nomeadamente à Eng.^a Carla Sousa e ao Eng.^o Nuno Pinto.
- ❖ A todos os colaboradores do Laboratório Central da Mota-Engil, Engenharia e Construção, S. A.
- ❖ Aos docentes do ISEP, que tanto me ensinaram nestes cinco anos de estudo.
- ❖ Aos meus amigos que me acompanharam neste processo.

Palavras-chave

Compactação, Aterros, ETAR, Controlo da compactação, Grau de compactação.

Resumo

O presente estudo, destinado à avaliação do controlo da compactação dos solos aplicados na ETAR de Castelo Branco, permitiu a sistematização da informação relativa à análise e à interpretação dos resultados obtidos nos ensaios realizados na referida obra.

Primeiramente, foram realizados ensaios laboratoriais para a determinação das propriedades dos solos e do agregado. A partir dos resultados obtidos nos ensaios foi possível, através de uma análise estatística, a avaliação e comparação com os valores obtidos *in situ*, com recurso ao método do gamadensímetro.

Este estudo permitiu obter os valores típicos de cada camada de material para os parâmetros da baridade húmida, do teor em água, da baridade seca e do grau de compactação. Posteriormente, foram comparados os resultados da baridade seca com o valor da baridade seca máxima e os resultados do teor em água com o teor em água ótimo de cada material.

O controlo da qualidade da obra é garantido no cumprimento dos requisitos exigidos nos Cadernos de Encargos. Os valores obtidos nos ensaios laboratoriais e *in situ*, ao longo da realização da obra, foram comparados com o Caderno de Encargos da Estradas de Portugal, as especificações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, as recomendações do Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC/SETRA) e as classificações de materiais que mais são utilizadas em Portugal. Estes documentos descrevem os procedimentos a considerar, quer na caracterização do material, quer na sua aplicação em obra, compactação e respetivo controlo.

Foram ainda descritos os métodos e equipamentos de compactação mais recorrentes em obras de terraplenagens, assim como a seleção do tipo de equipamento compactador e algumas técnicas de correção do teor em água dos materiais a compactar.

Por fim, os resultados da análise revelaram que os resultados obtidos com o gamadensímetro correspondem às exigências das recomendações enumeradas.

Keywords

Compaction, Landfill, Water Treatment Plant, Compaction control, Compaction degree.

Abstract

The present study, for the evaluation of compaction control performed at a Water Treatment Plant, in the municipality of Castelo Branco, allowed the organization of the data obtained from the analysis and interpretation of the results achieved after field work.

Soil and aggregate properties were first determined by laboratory tests. Therefore, throughout a statistical analysis, the lab results were compared with those measured *in situ* using a nuclear density gauge. The typical values of each material layer were obtained, such as the wet density, moisture content, dry density and compaction degree.

The quality of the compaction control must be assured with the compliance of the owner's specifications. The results obtained in lab testing and in place testing, during the construction, were compared with the EP's specifications, the LNEC's and LCPC/SETRA's recommendations and the material classifications that are more frequently used in Portugal. These describe the procedures applied in the material characterization, also its appliance as a construction material, including the compactions and control.

It was as well described the most used compaction methods and equipment in landfill, how to choose the right equipment and some technics to adjust the material's water content.

In the end, the results obtained with the nuclear density gauge match the specifications presented in this work.

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Enquadramento geral.....	3
1.2.	Objetivos do trabalho.....	4
1.3.	Estrutura do relatório.....	4
2.	A compactação	7
2.1.	Introdução	8
2.2.	Propriedades dos solos compactados	11
2.3.	Compactação no laboratório <i>versus</i> compactação no campo	12
2.3.1.	Ensaio laboratoriais de identificação do solo	12
2.3.1.1.	Análise granulométrica.....	12
2.3.1.2.	Limites de consistência.....	15
2.3.2.	Ensaio laboratoriais de compactação do solo	17
2.3.2.1.	Ensaio Proctor	17
2.3.2.2.	Ensaio CBR	19
2.3.3.	Compactação no campo.....	21
3.	Classificação do material para aterro.....	23
3.1.	Introdução	24
3.2.	Classificação de Solos Unificada.....	25
3.3.	Classificação de Solos AASHTO.....	28
3.4.	Classificação Francesa LCPC/SETRA.....	32
3.4.1.	Classificação de solos	32
3.4.2.	Classificação de materiais rochosos	34
3.4.3.	Classificação de solos orgânicos e subprodutos industriais.....	34
3.5.	Recomendações para a utilização do material em aterro e sua execução	35
3.5.1.	Especificações LNEC	37
3.5.1.1.	Especificação LNEC E 241:1971	37
3.5.1.2.	Especificação LNEC E 242:1971	37
3.5.2.	Recomendações LCPC/SETRA.....	39
3.5.3.	Recomendações do Caderno de Encargos da Estradas de Portugal (EP).....	41
4.	Métodos e equipamentos de compactação.....	47
4.1.	Introdução	48
4.2.	Equipamentos de compactação mais utilizados	49
4.2.1.	Cilindros de pés de carneiro	49
4.2.2.	Cilindros de pneus	50
4.2.3.	Cilindros de rolos lisos.....	50
4.2.4.	Cilindros vibradores.....	51
4.2.5.	Rolos de impacto	52
4.3.	Controlo contínuo da compactação	53
4.4.	Seleção dos equipamentos.....	54
4.5.	Operações para a correção do teor em água ótimo	55
4.6.	Outros métodos de compactação	57
4.6.1.	Vibroflutuação.....	57
4.6.2.	Compactação dinâmica	58
4.7.	Recomendações para as operações de compactação.....	59
5.	Controlo da qualidade dos aterros. Ensaio para o controlo da compactação	63
5.1.	Introdução	64
5.2.	Método radioativo	67
5.3.	Outros métodos de ensaios para o controlo da compactação	69
5.4.	Considerações sobre o estado da compactação	71
6.	Estudo experimental	73
6.1.	Introdução	74

6.2.	Enquadramento do local	74
6.2.1.	Localização geográfica.....	74
6.3.	Enquadramento da obra	75
6.4.	Descrição dos trabalhos	76
6.5.	Metodologia de ensaios	77
6.6.	Ensaio <i>in situ</i>	81
6.6.1.	Resultados do gamadensímetro.....	81
7.	Conclusões.....	111
7.1.	Solo.....	113
7.2.	Agregado	114
7.3.	Trabalhos futuros	114
	Referências bibliográficas	115
	ANEXO I – Boletins dos ensaio de caracterização do solo A1162	I
	ANEXO II – Boletins dos ensaio de caracterização do AGE	III
	ANEXO III – Boletins dos ensaios do controlo da compactação do solo A1162.....	V
	ANEXO IV – Boletins dos ensaios do controlo da compactação do AGE.....	VII

Índice de Figuras

Figura 1 - Representação do estado físico de um solo polifásico -----	8
Figura 2 - Representação da curva de compactação e de saturação de um solo -----	9
Figura 3 - Representação das curvas de compactação para diferentes energias de compactação	10
Figura 4 - Curvas de compactação para diferentes tipos de solos -----	11
Figura 5 – Dimensões e métodos de análise granulométrica de diferentes materiais -----	12
Figura 6 – Curva granulométrica de um solo pelo método da peneiração e série de peneiros ASTM -----	13
Figura 7 – Determinação dos limites de consistência: A – Limite de liquidez; B – Limite de plasticidade -----	15
Figura 8 - Equipamentos: A - Proctor; B – CBR -----	17
Figura 9 – Curva de compactação de um solo obtida no ensaio de Proctor -----	18
Figura 10 – Curva do ensaio CBR, para 3 provetes -----	20
Figura 11 – Metodologia de compactação de um solo aplicado em obra -----	22
Figura 12 – Diagrama indicativo dos nomes a atribuir aos solos de acordo com a respetiva curva granulométrica -----	24
Figura 13 – Ábaco para determinar o Índice de Grupo -----	30
Figura 14 – Esquema ilustrativo da estrutura de um aterro -----	36
Figura 15 - Cilindro de pés de carneiro -----	49
Figura 16 - Cilindro de pneus -----	50
Figura 17 - Cilindro de rolos lisos vibradores -----	51
Figura 18 - Representação do efeito de diferentes frequências e amplitudes num cilindro vibrador -----	52
Figura 19 - Rolo de impacto -----	52
Figura 20 – Figura ilustrativa de um equipamento de CCC e dos sistemas integrados que permitem a otimização do processo da compactação -----	53
Figura 21 – Esquema demonstrativo da variação do tipo de material a compactar e equipamentos a aplicar -----	55
Figura 22 – Regulação do teor em água com recurso a um camião cisterna -----	55
Figura 23 – Redução do teor em água do solo com cal -----	56
Figura 24 - A: Vibroflutuação com deslocamento do solo; B: Vibroflutuação com substituição do solo -----	57
Figura 25 - Compactação dinâmica de área extensa -----	58
Figura 26 – Equipamento Troxler a efetuar controlo da compactação em obra -----	67
Figura 27 – Gamadensímetros: A – Transmissão direta; B – Transmissão indireta; C – Determinação do teor em água -----	68
Figura 28 – Localização geográfica da área em estudo: A – Mapa da região; B – Local da obra ---	74
Figura 29 – ETAR de Castelo Branco -----	75
Figura 30 – Execução do aterro para um dos tanques de arejamento -----	76
Figura 31 – Compactação da camada de agregado da via de acesso à ETAR -----	76
Figura 32 - Curva granulométrica do solo ensaiado -----	78
Figura 33 - Curva de compactação Proctor do solo -----	78
Figura 34 – Curva granulométrica do AGE -----	79
Figura 35 – Controlo de compactação na camada de solo junto ao tanque de arejamento -----	80
Figura 36 – Esquema representativo das camadas de solo aplicadas na obra -----	81
Figura 37 – Representação gráfica do número de ensaios realizados em cada camada -----	82
Figura 38 – Histograma para a baridade húmida -----	86
Figura 39 – Histograma para o teor em água -----	86
Figura 40 - Gráfico representativo da evolução da baridade seca -----	87
Figura 41 – Histograma para o grau de compactação -----	87
Figura 42 – Gráfico representativo da evolução da baridade húmida -----	89
Figura 43 - Gráfico representativo da evolução do teor em água -----	90

Figura 44 – Gráfico representativo da variação da baridade seca -----	92
Figura 45 - Gráfico representativo da evolução do grau de compactação -----	93
Figura 46 - Evolução do grau de compactação em função do teor em água -----	94
Figura 47 – Evolução do grau de compactação em função do teor em água -----	94
Figura 48 – Esquema simplificado da ordem das camadas para o AGE -----	95
Figura 49 – Gráfico representativo do n.º de ensaios realizados em cada camada de agregado --	95
Figura 50 – Histograma da baridade húmida -----	98
Figura 51 - Histograma do teor em água -----	98
Figura 52 - Histograma da baridade seca -----	99
Figura 53 - Histograma do grau de compactação -----	99
Figura 54 - Gráfico representativo da evolução da baridade húmida -----	100
Figura 55 - Gráfico representativo da evolução do teor em água -----	101
Figura 56 - Gráfico representativo da evolução da baridade seca na primeira camada de agregado -----	102
Figura 57 - Gráfico representativo da evolução do grau de compactação na primeira camada de agregado-----	102
Figura 58 – Evolução do grau de compactação em função do teor em água-----	103
Figura 59 - Evolução do grau de compactação em função do teor em água-----	103
Figura 60 – Histograma para a baridade húmida -----	105
Figura 61 - Histograma para o teor em água -----	105
Figura 62 - Histograma para a baridade seca -----	106
Figura 63 - Histograma para o grau de compactação -----	106
Figura 64 - Gráfico representativo da evolução da baridade húmida -----	107
Figura 65 - Gráfico representativo da evolução do teor em água -----	108
Figura 66 - Gráfico representativo da evolução da baridade seca -----	109
Figura 67 - Gráfico representativo da evolução do grau de compactação -----	110
Figura 68 – Evolução do grau de compactação em função do teor em água -----	110

Índice de Quadros

Quadro 1 – Classificação dos solos arenosos quanto à compactidade	15
Quadro 2 - Estados de comportamento de um solo com teores em água crescentes	16
Quadro 3 – Classificação do solo argiloso quanto à sua consistência	16
Quadro 4 - Diferentes tipos de compactação Proctor	19
Quadro 5 – Diferentes tipologias do ensaio CBR	19
Quadro 6 – Classificação de Solos Unificada	25
Quadro 7 – Propriedades dos grupos de solos da Classificação Unificada	28
Quadro 8 – Classificação de solos AASHTO	29
Quadro 9 – Propriedades dos grupos de solos da Classificação AASHTO	31
Quadro 10 – Descrição dos parâmetros utilizados na classificação de solos LCPC/SETRA	32
Quadro 11 – Valores mínimos do grau de compactação, em função da classificação do solo	38
Quadro 12 – Resumo das condições de utilização dos materiais em aterro	39
Quadro 13 - Resumo das condições de utilização dos materiais em leito do pavimento	40
Quadro 14 – Utilização dos solos descrita no Caderno de Encargos da EP	42
Quadro 15 – Características do solo a aplicar no leito do pavimento	43
Quadro 16 – Fuso granulométrico para os materiais granulares não britados	44
Quadro 17 - Características dos materiais granulares não britados a aplicar no Leito do Pavimento	44
Quadro 18 - Fuso granulométrico para os materiais granulares britados	44
Quadro 19 - Características dos materiais granulares britados a aplicar no Leito do Pavimento ..	45
Quadro 20 – Quadro resumo das classificações LCPC/SETRA para os equipamentos de compactação	61
Quadro 21 – Ensaio a realizar em aterros de solos e a sua frequência	64
Quadro 22 – Ensaio a realizar em solos para o leito do pavimento e a sua frequência	65
Quadro 23 - Ensaio a realizar em materiais granulares para o leito do pavimento e a sua frequência	65
Quadro 24 – Métodos de ensaio realizados <i>in situ</i> para a medição da baridade seca e do teor em água	69
Quadro 25 – Ensaio realizado para a caracterização do material.....	77
Quadro 26 - Valores obtidos nos ensaios laboratoriais realizados ao solo.	77
Quadro 27 – Valores esperados para o peso volúmico seco de vários materiais	77
Quadro 28 – Resultados laboratoriais para a caracterização do AGE.....	79
Quadro 29 – Número de ensaios realizados <i>in situ</i>	80
Quadro 30 – Resultados obtidos nos ensaios <i>in situ</i> para cada camada de solo.....	82
Quadro 31 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro da baridade húmida ...	88
Quadro 32 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro do teor em água.....	89
Quadro 33 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro da baridade seca	91
Quadro 34 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro do grau de compactação.	92
Quadro 35 - Resultados obtidos nos ensaios <i>in situ</i> para cada camada de agregado da base do pavimento.	96
Quadro 36 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro da baridade húmida.	100
Quadro 37 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro do teor em água.....	100
Quadro 38 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro da baridade seca.	101
Quadro 39 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro do grau de compactação.	102
Quadro 40 - Resultados obtidos nos ensaios <i>in situ</i> para cada camada de agregado da via de acesso.....	104
Quadro 41 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro da baridade húmida.	107
Quadro 42 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro do teor em água.....	107

Quadro 43 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro da baridade seca.	108
Quadro 44 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro do grau de compactação.	109

Índice de Equações

Equação 1 - Volume do solo	8
Equação 2 – Peso do solo	9
Equação 3 – Peso específico seco	9
Equação 4 – Teor em água	9
Equação 5 – Curva de saturação	10
Equação 6 – Coeficiente de uniformidade	14
Equação 7 – Coeficiente de curvatura	14
Equação 8 – Índice de compacidade	15
Equação 9 – Índice de plasticidade	16
Equação 10 – Índice de consistência	16
Equação 11 – Energia de compactação	18
Equação 12 – Valor do CBR	20
Equação 13 – Grau de compactação	21
Equação 14 – Índice de grupo	29
Equação 15 – Valor do MB_c	45
Equação 16 – Amplitude teórica a vazio	61

Abreviaturas

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

AGE – Agregado de granulometria extensa

ALT – Índice de alterabilidade

ASTM – American Society for Testing and Materials

CBR – California Bearing Ratio

CCC – Controlo contínuo da compactação

CE – Caderno de Encargos

EA – Energia de Compactação

EA – Equivalente de areia

ECP – Ensaio de Carga em Placa

Ec – Energia de compactação

EP – Estradas de Portugal

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

FR – Índice de fragmentabilidade

FS – Coeficiente de friabilidade

GA – Garrafa de areia

GC – Grau de compactação

IA – Índice de achatamento

IG – Índice de grupo

JAE – Junta Autónoma de Estradas

LA – Coeficiente de Los Angeles

LABC – Laboratório Central

LCPC/SETRA – Laboratoire central des ponts et chaussées

LNEC: Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LP – Leito do Pavimento

MB – Azul-de-metileno

MB_c – Azul-de-metileno corrigido

MDE – Coeficiente Micro-Deval

MO – Matéria Orgânica

NP – Não plástico

NP – Norma Portuguesa

PIA – Parte Inferior do Aterro

PSA – Parte Superior do Aterro

S – Grau de saturação

Simbologia

A0 – amplitude teórica a vazio

C – Compactação

c – N.º de camadas (Ensaio do Proctor)

C_c – Coeficiente de curvatura

C_u – Coeficiente de conformidade

D₁₀ – Diâmetro efetivo em que 10% em peso de partículas têm dimensões inferiores a D₁₀

D₃₀ – Diâmetro efetivo em que 30% em peso de partículas têm dimensões inferiores a D₃₀

D₆₀ – Diâmetro efetivo em que 60% em peso de partículas têm dimensões inferiores a D₆₀

DD – Baridade seca *in situ*

D_{máx} – Diâmetro máximo das partículas

E – Extração

e – Índice de vazios

e_{máx} – Índice de vazios máximo

e_{mín} – Índice de vazios mínimo

F – Força de penetração (Ensaio do CBR)

F – Percentagem de passados no peneiro 0,075 mm (Classificação AASHTO)

G – Densidade das partículas

G – Granulometria

h – Altura de queda do pilão (Ensaio do Proctor)

H – Altura do aterro

I_c – Índice de consistência

I_b – Índice de compacidade

I_p – Índice de plasticidade

IPI – Índice de capacidade de carga imediato (Ensaio do CBR)

kgf – Quilograma força

L – comprimento da geratriz dum cilindro vibrador ou estático

M1 – Massa total aplicável sobre a geratriz dum cilindro vibrador ou estático

n – N.º de pancadas por camada de solo (Ensaio do Proctor)

NaCl – Cloreto de Sódio

P – Peso do pilão (Ensaio do Proctor)

Pi - Cilindros de pneus

PQi - Placas Vibradoras

Q – Volume de solo compactado durante um dado período de tempo

R – Espalhamento

S – Proteção superficial
S – Superfície percorrida pelo compactador durante um dado período de tempo
SPi - Cilindros estáticos de pés de carneiro
T – Tratamento
tf – Tonelada força
V – Volume do molde cilíndrico (Ensaio do Proctor)
V – Volume do solo
Va – Volume do ar
Vi - Cilindros vibradores de rolo liso
VPi - Cilindros vibradores de pés de carneiro
Vs – Volume das partículas sólidas
Vv – Volume de vazios
Vw – Volume da água
w – Peso do solo
W – Teor em água
Wa – Peso do ar
WD – Baridade húmida
W_L – Limite de liquidez
w_{ot} – Teor em água ótimo
w_{otm} - Teor em água ótimo referido ao ensaio de Proctor Modificado
w_{otn} - Teor em água ótimo referido ao ensaio de Proctor Normal
W_p – Limite de plasticidade
W_s – Limite de retração
Ws – Peso das partículas sólidas
Ww – Peso da água
γ – Valor da força normalizada para determinada penetração (Ensaio do CBR)
γ_d – Peso específico seco
γ_{d, máx} – Peso específico seco máximo
γ_w – Peso específico da água
γ_{ssd}, WA₂₄ – Det. da massa volúmica e absorção água
γ_{dfc} – Peso específico seco no fundo da camada

1. Introdução

1. Introdução

Este documento constitui o relatório de estágio, no âmbito da unidade curricular de Dissertação/Estágio/Projeto do Curso de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente (EGG|ISEP), lecionada no 2º Ano deste curso pelo Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP, para a conclusão do segundo ciclo de estudos, Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, no corrente ano letivo 2012/2013.

O projeto inerente a este relatório realizou-se no Laboratório Central da Mota-Engil, Engenharia e Construção, S.A., localizado em Canelas, Vila Nova de Gaia. Esta empresa tem sede em Amarante e escritórios no Porto e Lisboa. A sua atividade iniciou-se em 2003 com a fusão entre as empresas Mota & Companhia, SA e a Engil, SA, sendo o seu sector de atividade a construção civil e obras públicas. A presença da Mota-Engil, S.A. estende-se por todo o território nacional e por vários países de África, Europa de Leste e América Latina.

O LABC coordena os diversos laboratórios das obras e pedreiras espalhados pelo país. Este foi montado em 1988, pertencendo à Mota & Companhia, SA e tem vindo a evoluir, tendo alargado o espectro da sua atividade. Atualmente é uma unidade prestadora de serviços de controlo de qualidade dos mais diversos tipos de obras, com predominância das obras rodoviárias.

A sua atividade é centrada fundamentalmente nas obras da Mota-Engil, SA, embora também desenvolva trabalhos para clientes externos. Dentro deste princípio assume particular relevo no apoio às áreas das terraplanagens e pavimentações, em especial:

- Na identificação e caracterização de solos, agregados, rochas, subprodutos industriais e ligantes (hidráulicos e betuminosos);
 - Na formulação de misturas betuminosas e hidráulicas;
 - Em estudos de dimensionamento de pavimentos rodoviários;
 - Na instrumentação e auscultação de pavimentos em serviço.

A posição de liderança e destaque neste sector tem sido mantida pela empresa através de uma política continuada de qualidade, investigação, desenvolvimento técnico e tecnológico, estando esta Certificada segundo a norma ISO 9001, OHSAS 18001 e ISO 14001.

Na sequência desta certificação, o LABC, cuja experiência acumulada permitiu a construção de uma imagem baseada na isenção e competência técnica, obteve a respetiva acreditação segundo a NP EN ISO/IEC 17025, em Fevereiro de 2003 (certificado nº 03/L.343), transmitindo aos seus clientes confiança nos resultados dos ensaios que realiza.

O LABC desenvolve cerca de 200 ensaios diferentes e dispõe de 50 ensaios acreditados.

1.1. Enquadramento geral

A compactação é uma técnica de melhoramento das características intrínsecas de um solo e é utilizada pelo Homem desde a antiguidade.

As técnicas de melhoramento de solos, relativamente a solos a utilizar como material de construção, alteram uma ou mais características do solo, em resultado de ações de natureza física, química ou mecânica. Na determinação do grau de melhoramento a obter é necessário atender aos seguintes pontos (Mendonça, 2012):

- Objetivos do melhoramento;
- Características dos materiais a melhorar e da estrutura a realizar;
- Tipo de melhoramento pretendido;
- Possibilidade de controlo;
- Disponibilidade de recursos;
- Seleção da técnica mais adequada.

Quanto à escolha da(s) técnica(s) de melhoramento, esta deve considerar fatores como:

- Tipo de solo e condições hidrológicas;
- Tipo e grau de melhoramento pretendido;
- Custos previstos e tempo disponível;
- Riscos de danificação ou de contaminação;
- Possibilidade de controlo;
- Experiência anterior de utilização;
- Equipamentos e materiais disponíveis.

A compactação baseia-se na aplicação repetida e rápida de cargas, que conduzem à expulsão do ar sem uma significativa variação da quantidade de água presente no solo. A área de contacto entre partículas sólidas aumenta, aumentando assim a resistência do solo e diminuindo o índice de vazios, a deformabilidade e a permeabilidade.

As técnicas de compactação evoluíram para solucionar problemas de estabilidade e estanquicidade em barragens e para a redução de assentamentos em pavimentos rodoviários. É de grande importância devido à crescente utilização de solos menos competentes como material de construção em grandes obras de geotecnia, designadamente em terraplenagens, obras rodoviárias, ETARs e barragens, dada a sua durabilidade, abundância e economia.

Também o avanço do conhecimento dos fenómenos relacionados com os métodos e equipamentos da compactação e respetivo controlo, assim como a introdução de novos materiais, em muito têm contribuído para o desenvolvimento desta técnica.

De modo a garantir o cumprimento dos requisitos exigidos no Caderno de Encargos da obra, é necessária a realização do controlo da compactação *in situ*. Este controlo permite determinar o grau de compactação do solo e do agregado de granulometria extensa.

1.2. Objetivos do trabalho

O presente trabalho tem como objetivo a avaliação de controlo de compactação dos materiais aplicados na obra de construção de uma ETAR, situada em Castelo Branco. Várias operações integram e desempenham um papel importante na construção de uma obra deste tipo, desde os métodos construtivos até à execução dos aterros. Este trabalho incide particularmente neste último ponto, nomeadamente nos métodos e equipamentos de compactação e no controlo da qualidade.

Foram abordados os vários aspetos a considerar nos trabalhos de compactação, particularmente para materiais com diferentes características e condições de aplicação, tendo sempre como propósito operações económicas e sustentáveis para a obra e o meio ambiente.

Assim, foi imprescindível a realização de uma pesquisa bibliográfica, no sentido de conhecer melhor o estado da arte relativamente aos seguintes assuntos:

- Caracterização e classificação de materiais;
- Equipamentos de compactação e de controlo usuais;
- Métodos para o controlo da qualidade da compactação.

O objetivo último deste trabalho é o de analisar os resultados obtidos nos ensaios de compactação *in situ* das camadas compactadas e proceder à sua comparação com os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais.

1.3. Estrutura do relatório

O presente trabalho está estruturado segundo os seguintes capítulos:

- Capítulo 1 – Introdução: é dado a conhecer um enquadramento atual do processo da compactação e quais os seus propósitos, mas são aqui também descritos os principais objetivos do presente trabalho;

- Capítulo 2 – A compactação: descreve o estado da arte sobre o tema da compactação, considera os conceitos importantes e os ensaios a realizar no laboratório e no campo;
- Capítulo 3 – Classificação do material para aterro: neste capítulo são explicadas as classificações de materiais mais importantes e as recomendações para a aplicação do material em aterro e a sua execução;
- Capítulo 4 – Métodos e equipamentos de compactação: apresenta os métodos e equipamentos de compactação mais utilizados, assim como algumas técnicas para a correção do teor em água dos materiais a compactar e apresenta outros métodos de compactação aplicados em situações específicas. Descreve também as recomendações da LCPC/SETRA e do Caderno de Encargos da Estradas de Portugal para a operação da compactação;
- Capítulo 5 – Controlo da qualidade dos aterros. Ensaio para o controlo da compactação: são descritos os métodos para determinar em laboratório e no campo os parâmetros da baridade seca e do teor em água dos materiais compactados. Neste capítulo o método radioativo é descrito com maior detalhe, uma vez que este método foi utilizado no controlo da compactação da obra em estudo neste trabalho. Ainda são dadas algumas indicações em relação ao estado da compactação;
- Capítulo 6 – Estudo experimental: aqui é realizado o enquadramento do local e da obra, assim como a metodologia dos ensaios realizados e a exposição dos resultados obtidos para os dois materiais aplicados e estudados;
- Capítulo 7 – Conclusões: são apresentadas as conclusões do estudo realizado e os trabalhos futuros que se poderão desenvolver no âmbito do melhoramento do controlo da compactação e análise dos resultados.

2. A compactação

2. A compactação

2.1. Introdução

São quatro as variáveis que influenciam o processo da compactação e determinam o tipo de equipamento a utilizar na referida operação:

- Peso específico seco;
- Teor em água;
- Energia de compactação;
- Tipo de solo.

Para melhor compreensão deste processo é importante relembrar o significado destas variáveis.

Segundo o Vocabulário de Estradas e Aeródromos do LNEC, um solo é um “conjunto natural de partículas minerais que podem ser separadas por agitação na água; os vazios entre as partículas contêm água e ar, separada e conjuntamente”. Ou seja, os solos são materiais polifásicos (Figura 1).

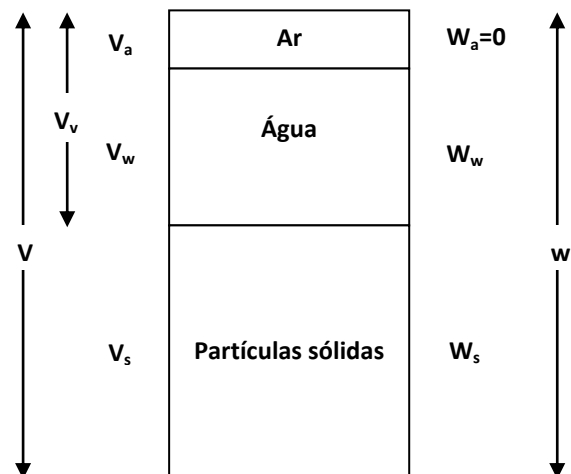


Figura 1 - Representação do estado físico de um solo polifásico (adaptado de Fernandes, 2004).

Denote-se que o volume do solo (V) engloba o volume do ar (V_a), da água (V_w) e das partículas sólidas (V_s), resultando o volume de vazios (V_v) na soma do volume do ar com o volume da água (Equação 1).

$$V = V_a + V_w + V_s \leftrightarrow V = V_v + V_s \quad \text{Equação 1}$$

Assim, também o peso total de uma amostra de solo (w) é a soma entre o peso do ar (W_a), o peso da água (W_w) e o peso das partículas sólidas (W_s) (Equação 2).

$$w = W_a + W_w + W_s \leftrightarrow w = W_w + W_s \quad \text{Equação 2}$$

A partir destas grandezas é possível determinar:

- **Peso específico seco:** exprime a relação entre o peso total e o volume aparente total do solo.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (\text{kN/m}^3) \quad \text{Equação 3}$$

- **Teor em água:** exprime a relação entre o peso da água e o peso das partículas sólidas numa amostra de solo.

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (\%) \quad \text{Equação 4}$$

No processo da compactação o índice de vazios do solo é reduzido devido à diminuição do volume do ar, aumentando o peso específico aparente, por meio da aplicação repetida de cargas. Não ocorre significativa alteração do teor em água nem alteração no volume das partículas sólidas durante a compactação (Santos, 2008). Ainda segundo o mesmo autor, com o aumento da área de contacto entre partículas sólidas aumenta a resistência e diminui o índice de vazios, a deformabilidade e a permeabilidade do solo.

A compacidade de um solo é determinada através da curva de compactação do solo, que relaciona o W e o γ_d .

O lado esquerdo da curva, onde os teores em água são inferiores ao $W_{ót}$, designa-se ramo seco, e o lado direito da curva, onde os teores em água são superiores ao $W_{ót}$, designa-se ramo húmido (Figura 2).

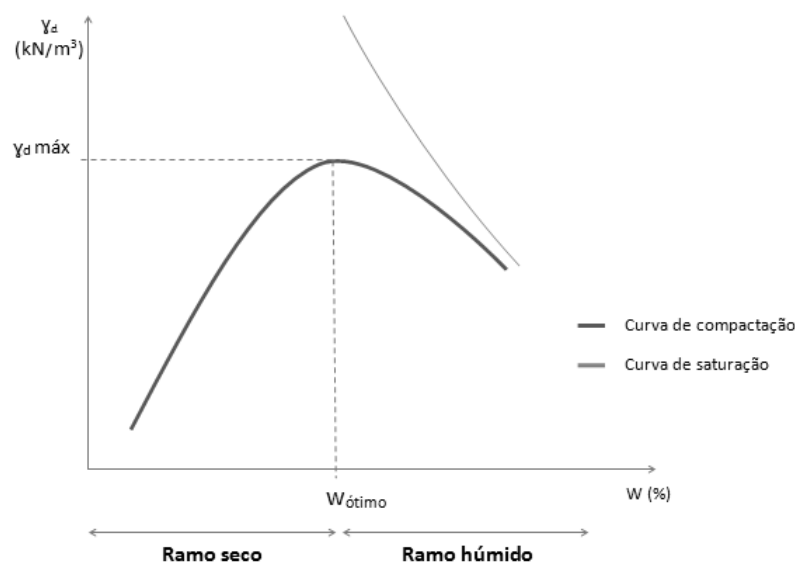


Figura 2 - Representação da curva de compactação e de saturação de um solo.

A curva de compactação de um solo depende da energia de compactação aplicada (Fernandes, 2004). Para um mesmo solo verifica-se que um aumento da energia de compactação (E_1 , E_2 , E_3 , E_4) tem como efeito o decréscimo do W_{ot} e o aumento do γ_d . Verifica-se, ainda, que os ramos húmidos das curvas de compactação se aproximam da curva de saturação (Figura 3).

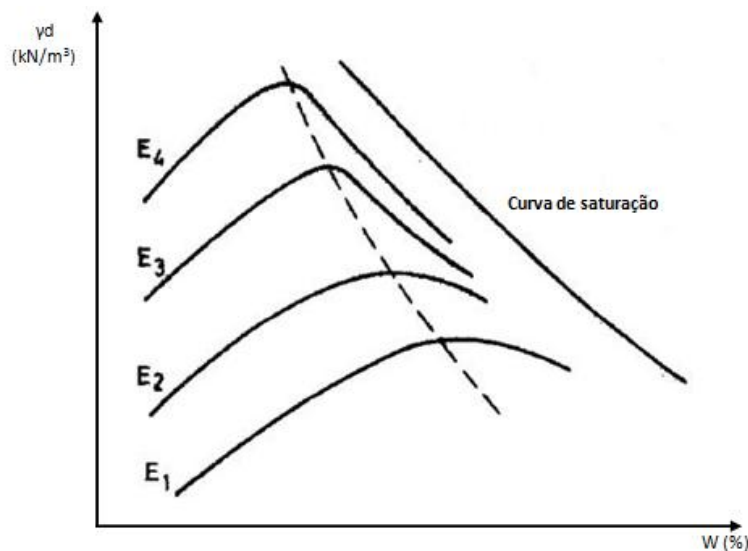


Figura 3 - Representação das curvas de compactação para diferentes energias de compactação (adaptado de Fernandes, 2004).

A curva de saturação obtém-se quando o volume de vazios está totalmente preenchido por água, ou seja, quando o solo apresenta um grau de saturação (S) de 100%. O S ótimo corresponde a valores entre 85% e 95%. A equação da curva de saturação é:

$$\gamma_d = \frac{G \gamma_w}{1 + G \times W} \quad \text{Equação 5}$$

Em que G é a densidade das partículas e γ_w é o peso específico da água.

É considerada uma curva teórica pois o processo de compactação não consegue expulsar a totalidade do ar existente dos vazios do solo.

Propriedades do solo como a granulometria, a forma e a densidade das partículas e ainda a quantidade e tipo de minerais de argila, são fatores que influenciam a forma e posição relativa da curva de compactação (Figura 4).

Pode constatar-se que quando um dado valor do W conduz ao valor máximo do γ_d , corresponde ao valor máximo da compacidade de um solo. Este W corresponde ao teor em água ótimo (W_{ot}).

Nos solos mais grossos o W_{ot} é, geralmente, mais reduzido, o que permite obter valores mais elevados de γ_d , logo maior compacidade.

Já nos solos com maior predomínio de argila o W_{ot} é substancialmente mais elevado, o que conduz a valores mais baixos de γ_d , logo são menos convenientes, em geral, como material de aterro (Fernandes, 2004).

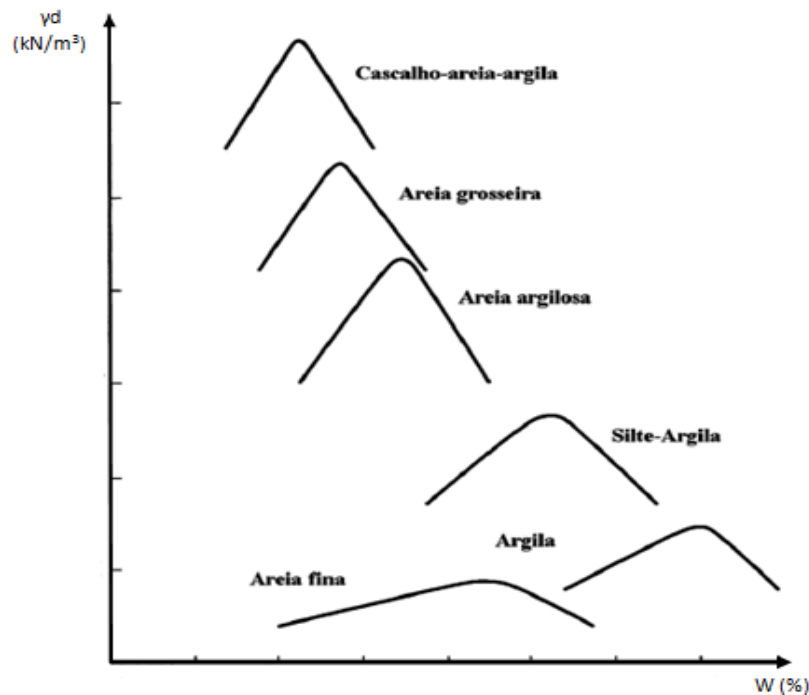


Figura 4 - Curvas de compactação para diferentes tipos de solos (Fernandes, 2004).

2.2. Propriedades dos solos compactados

A partir da curva de compactação pode ser observado que existem dois valores de γ_d para o mesmo W , um no ramo seco e outro no húmido da curva. O γ_d do ramo seco corresponde a um W menor do que o W do γ_d correspondente ao ramo húmido.

Esta diferença do teor em água para o mesmo γ_d pode conduzir a diferentes comportamentos do solo em obra, na escolha de um ou outro W para a compactação. Deve-se escolher um valor do W o mais próximo possível do W_{ot} , quer antes do W_{ot} ou depois do W_{ot} . Esta escolha depende essencialmente das características de comportamento desejadas para a obra.

Na escolha do W menor (ramo seco), o solo apresentará:

- Resistência ao corte elevada, aumentando com a energia de compactação;
- Variações da pressão da água nos vazios do solo praticamente nula, quando sujeito a carregamento;
- Eventuais fissuras;
- Expansão/colapso do solo, quando sujeito a aumento do teor em água.

Na escolha do W maior (ramo húmido), o solo apresentará:

- Menor resistência e pouca sensibilidade à variação da energia;
- Eventual ocorrência de elevada pressão da água nos vazios do solo;
- Solo com comportamento plástico;
- Praticamente não existe expansão/colapso do solo.

2.3. Compactação no laboratório versus compactação no campo

Para além das grandezas demonstradas anteriormente é sempre necessária uma caracterização das propriedades do solo a compactar. Esta caracterização implica a realização de ensaios laboratoriais de identificação e de compactação.

No campo são aplicados os métodos de compactação mais adequados, tendo em conta os resultados dos ensaios realizados em laboratório.

2.3.1. Ensaios laboratoriais de identificação do solo

Os ensaios de identificação realizados no laboratório têm como objetivo determinar a composição granulométrica do solo, os limites de consistência e o teor em água.

2.3.1.1. Análise granulométrica

A composição granulométrica do solo pode ser definida como a distribuição, em percentagem ponderal, das partículas de acordo com as suas dimensões.

Assim, segundo a especificação LNEC E 239 (1970) para a análise granulométrica por peneiração húmida, o ensaio pode ser realizado (Figura 5):

- Pelo método da peneiração (para partículas de dimensões superiores a 0,074 mm); ou
- Pelo método da sedimentação (para partículas de dimensões inferiores a 0,074 mm).

TIPO	Peneiração								Sedimentação			
	GROSSOS										FINOS	
	Seixos		Calhaus		Cascalho			Areia			Silte	Argila
		Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média	Fina					
Dimensão (mm)	200		60	20	6	2	0.6	0.2	0.06	0.002		
Símbolo gráfico												

Figura 5 – Dimensões e métodos de análise granulométrica de diferentes materiais (adaptado de Field Description of Soil and Rock – NZ Geotechnical Society, 2005).

A análise da Figura 5 permite constatar que o método da peneiração serve apenas para determinar a distribuição granulométrica das dimensões compreendidas entre as areias e os seixos. Os siltes e as argilas terão a sua distribuição granulométrica determinada pela sedimentação.

A peneiração consiste em fazer passar o material a ensaiar por uma série de peneiros de malha normalizada e cada vez mais apertada, representando o material retido em cada peneiro a fração de solo com dimensão superior à malha desse peneiro e inferior à malha anterior. Esse material é pesado para se averiguar que percentagem representa do peso total da amostra.

A sedimentação consiste em misturar o solo com água e observar o processo de sedimentação das partículas, segundo a Lei de Stokes. É medida a velocidade de queda das partículas, obtida através da medição do peso volúmico da suspensão obtida a diferentes intervalos de tempo.

Os resultados da análise granulométrica são representados em gráficos chamados curvas granulométricas (Figura 6). Neste gráfico, as dimensões das partículas estão representadas numa escala logarítmica no eixo das abcissas e as percentagens de material passado no eixo das ordenadas.

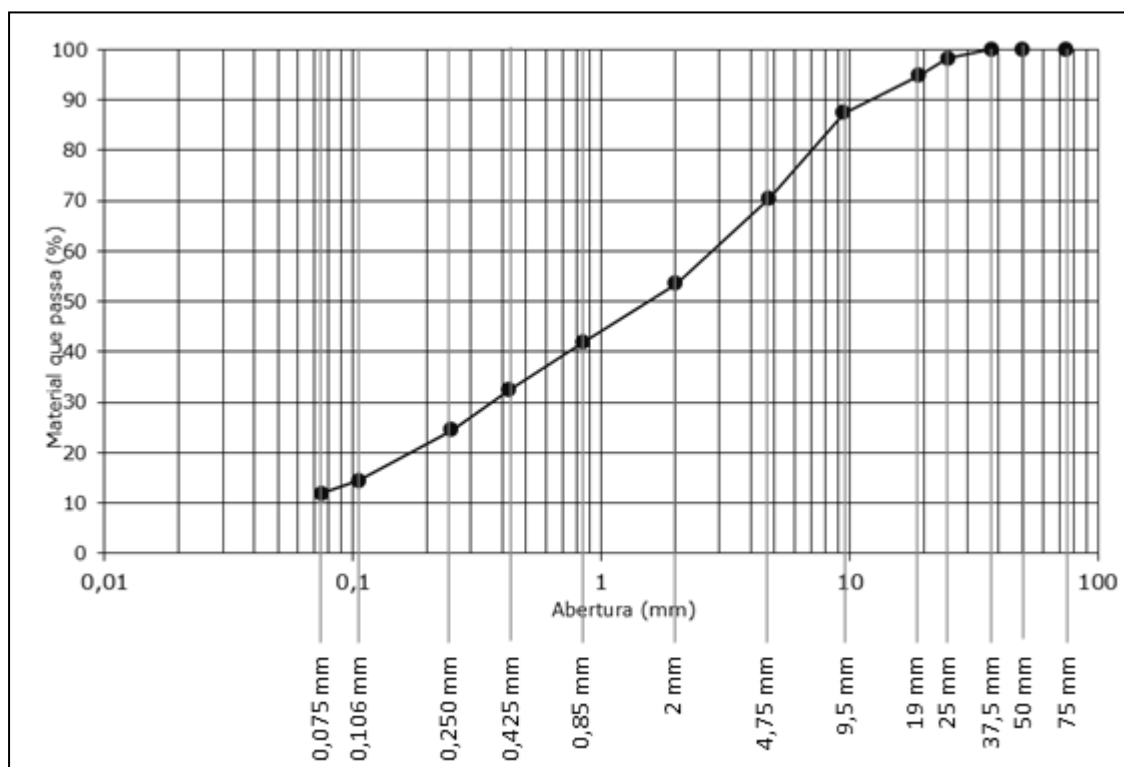


Figura 6 – Curva granulométrica de um solo pelo método da peneiração e série de peneiros ASTM.

Após a obtenção da curva granulométrica do solo podem ser determinadas outras grandezas importantes:

- **Diâmetro efetivo – D_{10}** : um solo com determinado diâmetro efetivo tem 10% em peso de partículas com dimensões inferiores a D_{10} (Fernandes, 2004).

- **Coefficiente de uniformidade – C_U** :

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Equação 6}$$

Em que D_{60} tem um significado análogo a D_{10} .

Este coeficiente permite indicar a variedade de dimensões que as partículas de um dado solo possuem. Quanto maior for o C_U maior será essa variedade, isto é, será um solo bem graduado.

Pelo contrário, um valor de C_U baixo corresponderá a um solo mal graduado (Fernandes, 2004).

- **Coefficiente de curvatura – C_C** :

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad \text{Equação 7}$$

Em que D_{30} tem um significado análogo a D_{10} e D_{60} .

O C_C está relacionado com a forma da curva granulométrica entre D_{10} e D_{60} . Se entre estes diâmetros a curva tiver uma evolução suave, C_C terá valores compreendidos entre 1 e 3, sendo assim o solo bem graduado (Fernandes, 2004).

Importância da análise granulométrica de um solo granular ou arenoso:

O comportamento dos solos granulares ou arenosos (siltes, areias e cascalho) é altamente dependente da forma e das dimensões das respetivas partículas.

Nos solos bem graduados, isto é, nos solos cujas partículas têm dimensões muito variáveis, em geral a gama de índices de vazios possíveis ($e_{\text{máx}} - e_{\text{mín}}$) é mais ampla e atinge valores muito baixos. Assim, nesses solos as partículas de menores dimensões podem arrumar-se nos espaços entre as maiores podendo ser alcançados arranjos muito compactos.

Quando um solo vai ser usado como material de aterro não é relevante se o solo está solto ou compacto no estado natural, mas sim a compacidade que pode atingir quando compactado. Ou seja, é importante a graduação do solo, pois quanto melhor graduado ele for, mais baixo será o

índice de vazios que a compactação lhe pode conferir, logo melhor será o seu comportamento sob as cargas atuantes no aterro.

No Quadro 1 refere-se uma classificação dos solos arenosos quanto à compactidade. O índice de compactidade I_D é calculado pela seguinte equação:

$$ID = \frac{e_{\text{máx}} - e}{e_{\text{máx}} - e_{\text{mín}}} \times 100 \quad (\%) \quad \text{Equação 8}$$

Quadro 1 – Classificação dos solos arenosos quanto à compactidade (Fernandes, 2004).

Areia	I_D (%)
Muito solta	0 – 15
Solta	15 – 35
Medianamente compacta	35 – 65
Compacta ou densa	65 – 85
Muito compacta ou muito densa	85 – 100

2.3.1.2. Limites de consistência

Os limites de consistência (ou limites de Atterberg) de um solo consistem na determinação do limite de liquidez e limite de plasticidade (Figura 7).

Estes limites estabelecem as fronteiras entre os diferentes estados do solo e são determinados segundo a NP-143:1969 – Solos: limites de consistência.

O campo de aplicação deste ensaio é para solos com cerca de 30% ou mais, em peso de partículas de dimensões inferiores a 0,05 mm. Ficam excluídos os solos predominantemente arenosos, para os quais o ensaio, mesmo quando possível, perde o seu significado.

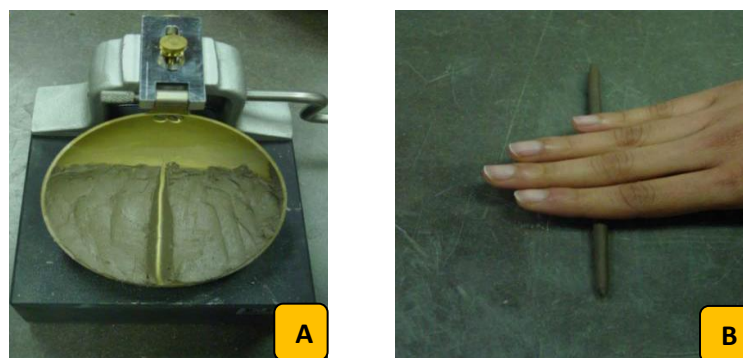


Figura 7 – Determinação dos limites de consistência: A – Limite de liquidez; B – Limite de plasticidade (<http://www.uic.edu>).

A importância deste ensaio reside no facto de ser possível ter uma ideia qualitativa em relação às características mecânicas, de permeabilidade e de trabalhabilidade de um solo fino.

No caso destes solos finos, constituídos essencialmente por silte e argila, a variação do w pode conduzir a diferentes estados e comportamentos (Quadro 2):

Quadro 2 - Estados de comportamento de um solo com teores em água crescentes (adaptado de Correia, 1980).

ESTADOS DE COMPORTAMENTO			
W crescente			
Sólido (não moldável)	Semi-sólido ou de comportamento friável	Plástico ou de comportamento moldável	Líquido ou de comportamento fluido
W_s	W_p		W_L

Verifica-se que o solo apresentará um comportamento moldável para teores em água compreendidos entre o limite de liquidez (W_L) e o limite de plasticidade (W_p).

A diferença numérica entre estas variáveis designa-se por índice de plasticidade (I_p):

$$IP = WL - WP \quad \text{Equação 9}$$

Também a comparação do W de um dado solo argiloso com os limites de consistência fornece uma indicação aproximada da consistência do solo, é o designado índice de consistência (I_c) (Equação 10):

$$IC = \frac{WL - W}{IP} \quad \text{Equação 10}$$

No seguinte quadro é apresentada a classificação do solo argiloso quanto à sua consistência:

Quadro 3 – Classificação do solo argiloso quanto à sua consistência (Fernandes, 2004).

Consistência do solo (argila)	I_c
Muito mole	0,0 - 0,25
Mole	0,25 - 0,50
Média	0,50 - 0,75
Dura, muito dura e rija	> 0,75

Em determinados solos não é possível determinar o W_L ou o W_p , logo o solo é não plástico (NP). Ainda, se o W_L for igual ao W_p o solo também é NP.

2.3.2. Ensaios laboratoriais de compactação do solo

Os ensaios de compactação realizados em laboratório são os ensaios Proctor e os ensaios CBR (Figura 8).

O objetivo destes ensaios é o de reproduzir em laboratório os resultados esperados durante a compactação *in situ* realizada pelos equipamentos compactadores.



Figura 8 - Equipamentos: A - Proctor (Fonte: maquesonda.pt); B – CBR (<http://www.matest.com/imgprodotti/S216KIT1.JPG>).

2.3.2.1. Ensaio Proctor

O ensaio Proctor determina o W_{ot} de um solo para o qual, com uma determinada energia de compactação, se consegue melhores resultados na compactação.

Isto é, para uma dada energia de compactação, determina-se o W para o qual se obtém um $\gamma_{d, \text{máx}}$.

Estes ensaios estão normalizados pela Especificação LNEC E 197 de 1966. A operação consiste em compactar uma amostra de solo em várias camadas num molde cilíndrico, em que cada camada é compactada com um determinado número de golpes, com um pilão de peso normalizado que cai de uma altura também normalizada.

Assim, é determinado o peso específico seco máximo e o teor em água do solo compactado. A energia específica de compactação (E_c) calcula-se do seguinte modo (Equação 11):

$$E_c = \frac{P \times h \times n \times c}{V} \quad \text{N.cm/cm}^3 \quad \text{Equação 11}$$

Em que:

- $E_c = 60 \text{ N.cm/cm}^3$ – em ensaio de Proctor leve
- $E_c = 265 \text{ N.cm/cm}^3$ – em ensaio de Proctor pesado
- P – peso do pilão (kg)
- h – altura de queda do pilão (cm)
- n - n.º de pancadas por camada de solo
- c - n.º de camadas
- V – volume do molde cilíndrico (cm^3)

Após várias repetições deste procedimento, é possível traçar a respetiva curva de compactação do solo e avaliar o γ_d e o W_{ot} para a E_c utilizada (Figura 9).

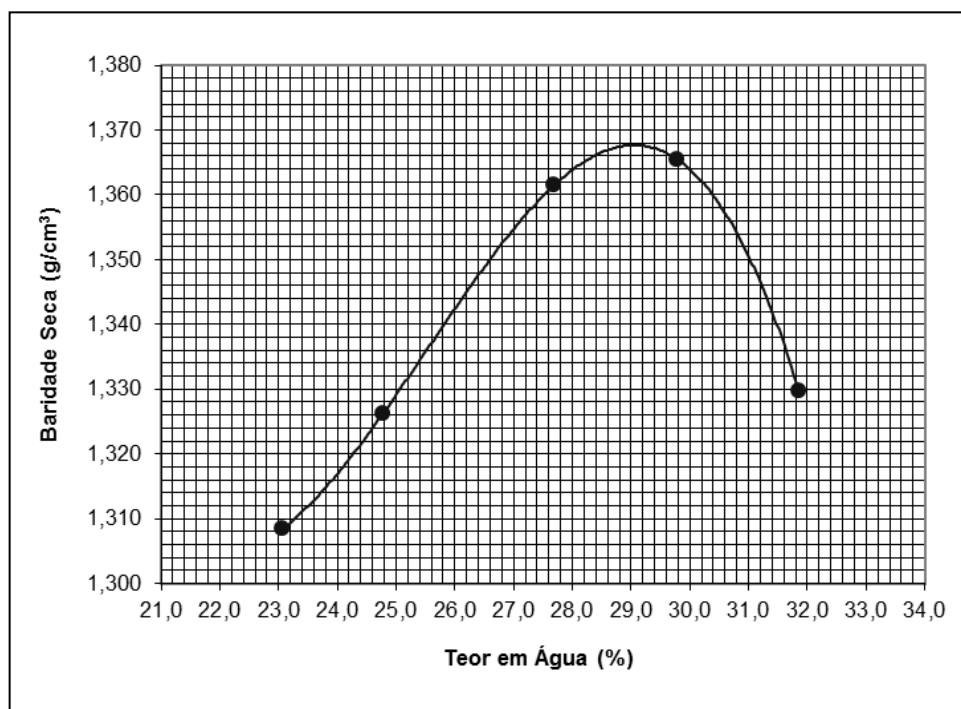


Figura 9 – Curva de compactação de um solo obtida no ensaio de Proctor.

No Quadro 4 estão resumidos os diferentes tipos de compactação existentes.

Quadro 4 - Diferentes tipos de compactação Proctor (LNEC E 197, 1966).

		Tipos de compactação			
		Leve		Pesada	
Molde	Diâmetro (mm)	102	152	102	152
	h (mm)	117	178	117	178
Peso do pilão (kg)		2,49	2,49	4,54	4,54
Altura de queda (cm)		30,5	30,5	45,7	45,7
N.º de camadas		3	3	5	5
N.º de pancadas por camada		25	55	25	55

2.3.2.2. Ensaio CBR

O ensaio CBR (*California Bearing Ratio*) permite determinar a capacidade de suporte de um solo. Segundo a especificação LNEC E 198 (1967) para o ensaio do CBR, este consiste em medir a força necessária para que um pistão normalizado penetre no solo até uma certa profundidade, com determinada velocidade.

O CBR traduz a força requerida para o pistão penetrar até essa profundidade, expressa em percentagem da força necessária para o mesmo pistão penetrar, até à mesma profundidade e com a mesma velocidade, num provete normalizado.

O CBR de um solo depende principalmente da sua baridade, do W usado na compactação e do W no momento da penetração.

Este ensaio pode ser realizado sobre provetes compactados em laboratório, imersos ou não, sobre amostras intactas ou diretamente sobre o solo *in situ* (Quadro 5).

Quadro 5 – Diferentes tipologias do ensaio CBR (LNEC E 198, 1967).

Ensaio sobre provetes compactados no laboratório	O solo é preparado utilizando as várias energias de compactação do ensaio de Proctor (12, 25 e 55 pancadas) e diferentes teores em água. Assim, determina-se para um dado teor em água a evolução do CBR com a compactação relativa, ou para uma dada compactação relativa a respetiva variação com o teor em água.
Ensaio com amostras intactas	Usados quando as condições naturais são os fatores dominantes.
Ensaios realizados <i>in situ</i>	Geralmente utilizam-se para o controlo da construção e para verificação da homogeneidade de plataformas. Em circunstâncias especiais utilizam-se também para o dimensionamento de pavimentos.

Para a realização do ensaio é necessária uma prensa capaz de realizar uma velocidade de penetração de 1 mm/min e de aplicar uma força de 5000 kgf.

Finalizado o ensaio de penetração, é traçada a curva força (kgf) – deformação (mm), são executadas as correções e determinado o valor do CBR (Figura 10).

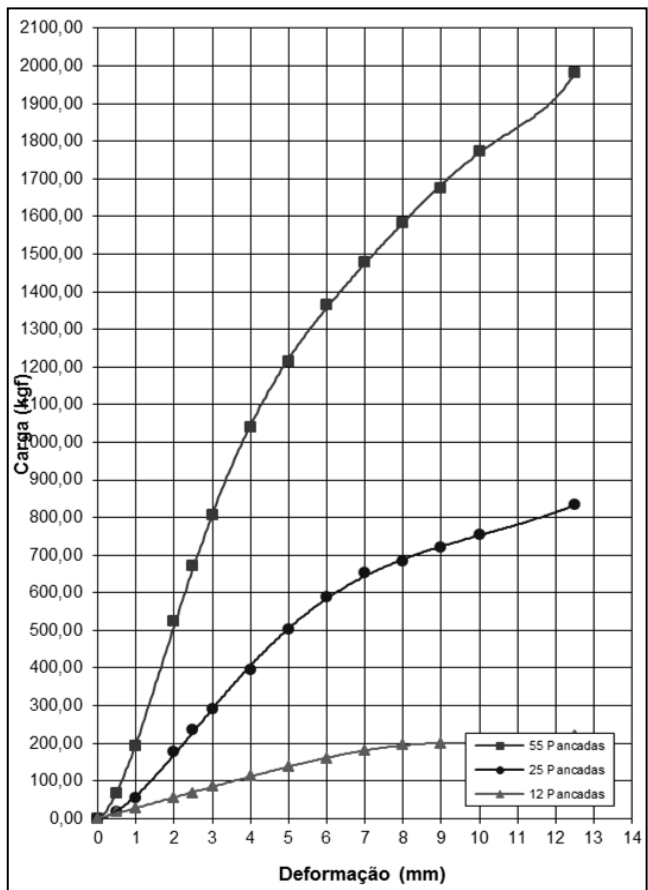


Figura 10 – Curva do ensaio CBR, para 3 provetes.

O CBR é, então, determinado a partir das forças correspondentes às penetrações de 2,5 e 5,0 mm (Equação 12):

$$CBR = \frac{F}{y} \times 100 \quad (\%) \quad \text{Equação 12}$$

Em que:

- F – Força (kgf)
- y - 1355 – Valor da força normalizada para uma penetração de 2,5 mm (kgf)
- y - 2033 – Valor da força normalizada para uma penetração de 5,0 mm (kgf)

Toma-se para o CBR do solo o valor correspondente à penetração de 2,5 mm.

Se o valor do CBR correspondente à penetração de 5 mm for superior ao valor do CBR para a penetração de 2,5 mm, o ensaio é repetido. Caso se confirme o resultado, toma-se para o valor do CBR do solo o correspondente à penetração de 5 mm.

2.3.3. Compactação no campo

Numa obra que envolva a utilização de solos para a execução de aterros, devem ser observados certos procedimentos até ao momento em que se realiza a compactação.

No projeto da estrutura é necessário ter em conta os seguintes aspetos (Vallejo, Ortuño, & Oteo, 2002):

- Um bom conhecimento das propriedades geológico-geotécnicas dos materiais;
- Um enquadramento regional e local das condições climáticas, hidrológicas e topográficas;
- Os processos erosivos que podem modificar as características resistentes da estrutura, a médio e longo prazos;
- Assegurar a estabilidade da estrutura;
- As deformações da estrutura ao longo do tempo.

A Equação 13 permite a determinação do grau de compactação *in situ*:

$$GC = \frac{\gamma_d (\text{campo})}{\gamma_d, \text{máx (laboratório)}} \times 100 \quad (\%) \quad \text{Equação 13}$$

Apresenta-se, em seguida, uma proposta para a metodologia de compactação de um solo aplicado em obra (Figura 11).

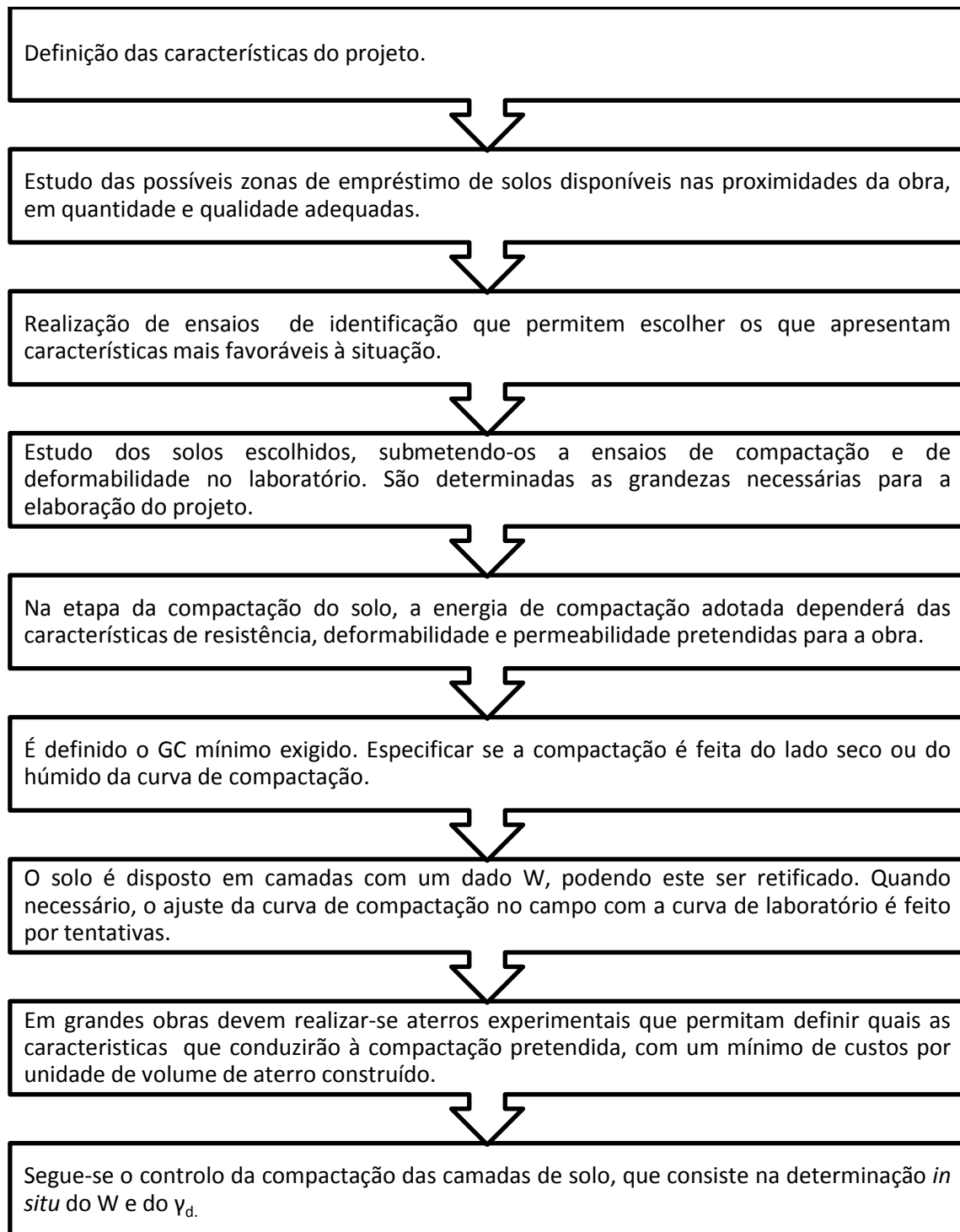


Figura 11 – Metodologia de compactação de um solo aplicado em obra.

3. Classificação do material para aterro

3. Classificação do material para aterro

3.1. Introdução

Antes da aplicação de um solo em obra é necessário realizar a sua caracterização e classificação, de modo a compreender as suas propriedades. Assim, são executados ensaios de identificação e de caracterização físico-mecânica, ou seja, a determinação das suas propriedades índice.

Existem várias classificações que se baseiam em diferentes parâmetros dos solos, como a distribuição granulométrica, a plasticidade, o estado hídrico e a génese.

Na classificação dos solos, interessa referir três tipos fundamentais (Fernandes, 2004):

- A classificação quanto aos tipos e dimensões das partículas que compõem os solos: divide os solos em argilas, siltes, areias e cascalho (ou seixo). Solos compostos por partículas cujos tamanhos correspondem a mais de um dos tipos referidos podem ser classificados através do Diagrama Triangular de Feret (Figura 12), após a determinação da respetiva curva granulométrica.

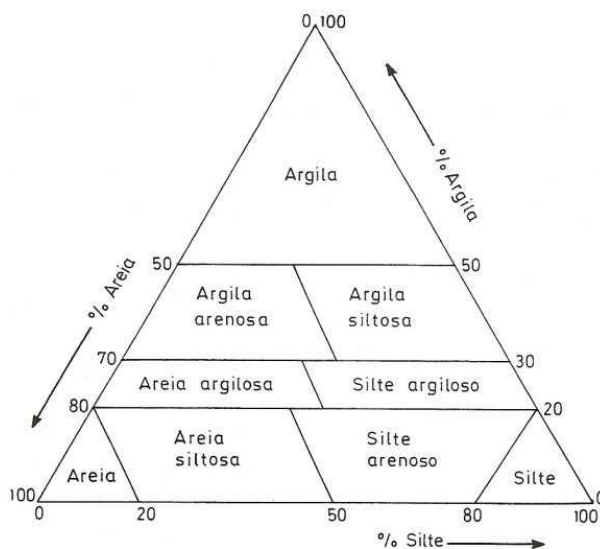


Figura 12 – Diagrama indicativo dos nomes a atribuir aos solos de acordo com a respetiva curva granulométrica (Fernandes, 2004).

- A classificação quanto à origem dos solos: divide os solos em dois grupos, os residuais e os transportados. Os solos residuais são aqueles que resultam da desintegração e/ou da decomposição *in situ* da rocha mãe, ou seja, aqueles que ocupam sensivelmente o mesmo espaço que ocupava a rocha que lhes deu origem. Os solos transportados (solos sedimentares) são aqueles que se formaram a maior ou menor distância da rocha mãe, após terem sido levados pela água, vento, glaciares ou pela ação da gravidade. Ainda importa referir que é usual a designação de aterro para um maciço formado pela ação do Homem.

• A classificação quanto às aplicações dos solos como materiais de construção: esta aptidão é determinada pela sua classificação. Das várias classificações, destacam-se a Classificação de Solos Unificada e a Classificação de Solos da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

A seguir são apresentadas as classificações mais utilizadas, isto é, a Classificação de Solos Unificada, a Classificação de Solos AASHTO e a Classificação LCPC/SETRA.

3.2. Classificação de Solos Unificada

Este sistema de classificação é descrito na norma ASTM D – 2487 (2011). É um sistema baseado nas características de identificação do solo determinadas em laboratório.

Como demonstra o Quadro 6, a classificação é dividida em três grupos básicos: solos grossos, solos finos e solos altamente orgânicos. Estes grupos subdividem-se ainda num total de quinze grupos de solos. Seguidamente é designado o grupo básico do solo, o símbolo, o nome do grupo e assim a sua classificação. Para os solos finos em que se determinam os limites de consistência, os valores obtidos são projetados na Carta de Plasticidade de Casagrande.

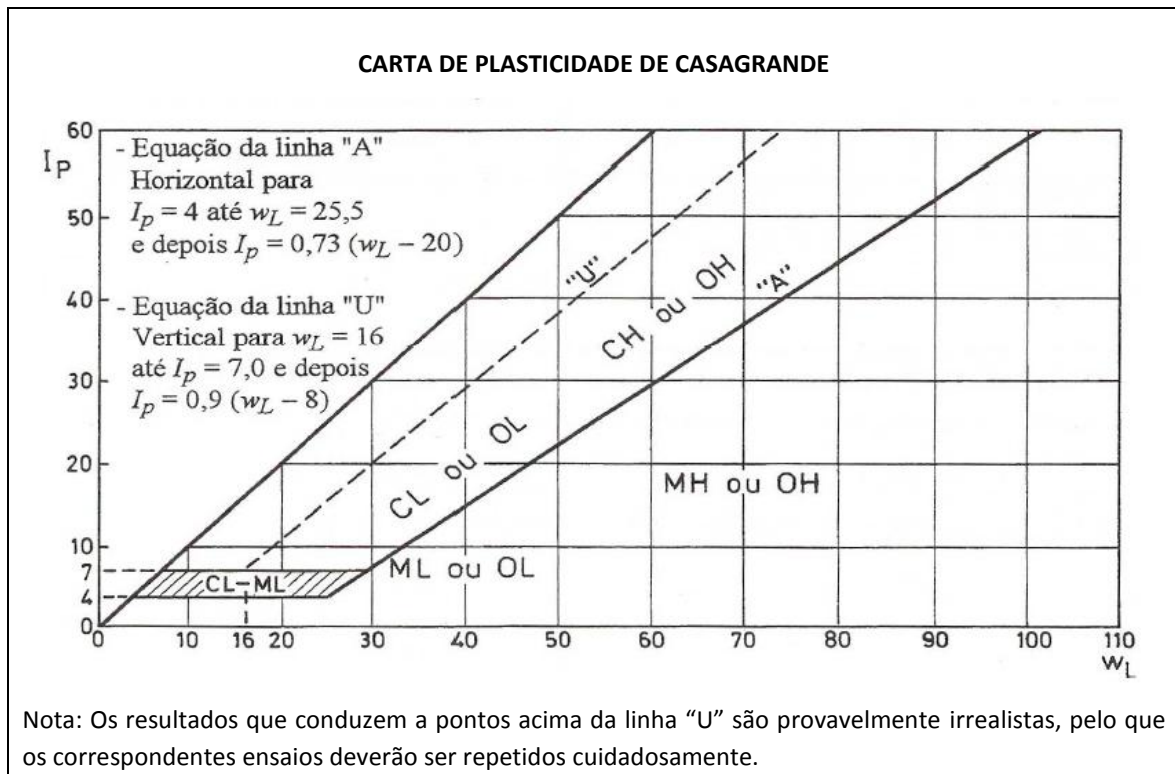
Quadro 6 – Classificação de Solos Unificada (ASTM D – 2487, 2011).

Critérios para designação dos símbolos e nome dos grupos utilizando ensaios de laboratório (a)				Classificação do solo	
				Símbolo do grupo	Nome do grupo (b)
SOLOS GROSSOS Mais de 50% retido no peneiro n.º 200	Cascalho	Cascalhos limpos	$C_u \geq 4$ e $1 \leq C_c \leq 3$ (e)	GW	Cascalho bem graduado (f)
		Menos de 5% de finos (c)	$C_u < 4$ e/ou $1 > C_c > 3$ (e)	GP	Cascalho mal graduado (f)
	Mais de 50% da fração grossa retida no peneiro n.º 4	Cascalhos com finos	Finos classificados como ML ou MH	GM	Cascalho siltoso (f), (g), (h)
		Mais de 12% de finos (c)	Finos classificados como CL ou CH	GC	Cascalho argiloso (f), (g), (h)
	Areia	Areias limpas	$C_u \geq 6$ e $1 \leq C_c \leq 3$ (e)	SW	Areia bem graduada (i)
		Menos de 5% de finos (d)	$C_u < 6$ e/ou $1 > C_c > 3$ (e)	SP	Areia mal graduada (i)
		Areias com finos	Finos classificados como ML ou MH	SM	Areia siltosa (g), (h), (i)
		Mais de 15% de finos (d)	Finos classificados como CL ou CH	SC	Areia argilosa (g), (h), (i)

Quadro 6. 1 - Classificação de Solos Unificada (ASTM D – 2487, 2011) (continuação).

Critérios para designação dos símbolos e nome dos grupos utilizando ensaios de laboratório (a)				Classificação do solo		
				Símbolo do grupo	Nome do grupo (b)	
SOLOS FINOS 50% ou mais passado no peneiro n.º 200	Siltes e Argilas $W_L < 50\%$	Inorgânico	IP > 7 e situa-se na linha A ou acima desta (j)	CL	Argila magra (g), (h), (i)	
			IP < 4 ou situa-se abaixo da linha A (j)	ML	Silte (g), (h), (i)	
	Siltes e Argilas $W_L \geq 50\%$	Orgânico	W_L (seco em estufa) / W_L (sem secagem) < 0,75	OL	Argila orgânica (k), (l), (m), (n) Silte orgânico (k), (l), (m), (o)	
			Inorgânico	IP situa-se na linha A ou acima desta	CH	Argila gorda (k), (l), (m)
	Siltes e Argilas $W_L \geq 50\%$	Orgânico		IP situa-se abaixo da linha A	MH	Silte elástico (k), (l), (m)
			W_L (seco em estufa) / W_L (sem secagem) < 0,75	OH	Argila orgânica (k), (l), (m), (p) Silte orgânico (k), (l), (m), (q)	
	Solos altamente orgânicos – principalmente matéria orgânica, cor escura e odor orgânico				PT	Turfa
	<p>(a) Baseado no material passado no peneiro 3” (75 mm).</p> <p>(b) Se a amostra tiver blocos e/ou calhaus junte “com blocos e/ou calhaus” ao nome do grupo.</p> <p>(c) Cascalho com 5% a 12% de finos precisa de dois símbolos: GW-GM Cascalho bem graduado com silte; GW-GC Cascalho bem graduado com argila; GP-GM Cascalho mal graduado com silte; GP-GC Cascalho mal graduado com argila.</p> <p>(d) Areia com 5% a 12% de finos precisa de dois símbolos: SW-SM Areia bem graduada com silte; SW-SC Areia bem graduada com argila; SP-SM Areia mal graduada com silte; SP-SC Areia mal graduada com argila.</p> <p>(e) $C_u = D_{60}/D_{10}$ e $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$.</p> <p>(f) Se o solo contém $\geq 15\%$ de areia, junte “com areia” ao nome do grupo.</p> <p>(g) Se os finos se classificam como CL-ML, use dois símbolos: GC-GM ou SC-SM.</p>			<p>(h) Se os finos são orgânicos, junte “com finos orgânicos” ao nome do grupo.</p> <p>(i) Se o solo contém $\geq 15\%$ de cascalho, junte “com cascalho” ao nome do grupo.</p> <p>(j) Se os limites de consistência se situam na zona sombreada da carta de plasticidade, o solo é um CL-ML Argila siltosa.</p> <p>(k) Se o solo contém 15 a 30% retido no peneiro n.º 200, junte “com areia” ou “com cascalho” conforme o predominante.</p> <p>(l) Se o solo contém $\geq 30\%$ retido no peneiro n.º 200, predominantemente arenoso, junte “arenoso” ao nome do grupo.</p> <p>(m) Se o solo contém $\geq 30\%$ retido no peneiro n.º 200, predominantemente cascalho, junte “cascalhento” ao nome do grupo.</p> <p>(n) IP ≥ 4 e situa-se na linha A ou acima desta;</p> <p>(o) IP < 4 ou situa-se abaixo da linha A.</p> <p>(p) IP situa-se na linha A ou acima desta.</p> <p>(q) IP situa-se abaixo da linha A.</p>		

Quadro 6. 2 - Classificação de Solos Unificada (ASTM D – 2487, 2011) (continuação).



A utilidade desta classificação reside no facto de a experiência de muitas obras ter possibilitado uma associação de cada um dos grupos de solos referidos a determinados comportamentos mais ou menos desejáveis para diversos fins. Na fase de estudo de determinada obra de aterro é assim possível, com base em ensaios tão simples como os de identificação, escolher, dentre os solos que se apresentem como passíveis de utilização na vizinhança da obra, aqueles que melhor correspondam às exigências daquela (Fernandes, 2004).

No Quadro 7 são resumidas algumas das propriedades dos grupos de solos definidos nesta classificação depois de compactados.

Quadro 7 – Propriedades dos grupos de solos da Classificação Unificada (Fernandes, 2004).

SÍMBOLO DO GRUPO	PROPRIEDADES IMPORTANTES			
	Permeabilidade quando compactado	Resistência ao corte quando compactado e saturado	Compressibilidade quando compactado e saturado	Trabalhabilidade como material de construção
GW	Permeável	Excelente	Desprezável	Excelente
GP	Muito permeável	Boa	Desprezável	Boa
GM	Semipermeável a impermeável	Boa	Desprezável	Boa
GC	Impermeável	Boa a razoável	Muito baixa	Boa
SW	Permeável	Excelente	Desprezável	Excelente
SP	Permeável	Boa	Muito baixa	Razoável
SM	Semipermeável a impermeável	Boa	Baixa	Razoável
SC	Impermeável	Boa a razoável	Baixa	Boa
ML	Semipermeável a impermeável	Razoável	Média	Razoável
CL	Impermeável	Razoável	Média	Boa a razoável
OL	Semipermeável a impermeável	Fraca	Média	Razoável
MH	Semipermeável a impermeável	Razoável a fraca	Alta	Fraca
CH	Impermeável	Fraca	Alta	Fraca
OH	Impermeável	Fraca	Alta	Fraca
PT	---	---	---	---

3.3. Classificação de Solos AASHTO

Esta classificação é descrita na norma AASHTO M 145 para solo e misturas de solo-agregado. É um sistema baseado nas características de identificação do solo determinadas em laboratório (análise granulométrica e limites de consistência), atendendo ao seu comportamento em obras rodoviárias.

Como demonstra o Quadro 8, a classificação é dividida em sete grupos, em que é determinado o Índice de grupo (IG) de cada um.

Quadro 8 – Classificação de solos AASHTO (AASHTO M 145).

Tipos de solos	MATERIAIS GRANULARES 35% ou menos passados no peneiro 0,074 mm (n.º 200) ASTM							MATERIAIS SILTO- ARGILOSOS Mais de 35% passados no peneiro 0,074 mm (n.º 200) ASTM			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Grupos e subgrupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
Granulometria, % passados:											
2,00 mm (n.º 10)	50 máx	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
0,420 mm (n.º 40)	30 máx	50 máx	51 mín	---	---	---	---	---	---	---	---
0,074 mm (n.º 200)	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Características da fração passada no peneiro 0,420 mm (n.º 40):											
W_L	---	---	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	41 mín (1)
IP	6 máx	NP	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	11 mín (1)
IG (2)	0	0	0	4 máx		8 máx	12 máx	16 máx	20 máx		
Tipos usuais dos constituintes significativos dos materiais	Fragmentos de rocha, cascalho e areia		Areia fina	Cascalho siltoso ou argiloso e areia				Solos siltsosos		Solos argilosos	
Comportamento da camada sob o pavimento	Excelente a bom					Regular a muito mau					
A-8	Classificação por inspeção visual, não dependem de análise granulométrica, W_L ou IP. Compostos por matéria orgânica parcialmente decomposta, com têm textura fibrosa, cor escura e odor orgânico.										
	Não se aplicam em aterros nem em camadas de sub-base. Altamente compressíveis e com baixa resistência.										
(1) O IP do subgrupo A-7-5 é \geq que o W_L menos 30. O IP do subgrupo A-7-6 é $>$ que o W_L menos 30.											
(2) O IG indica-se entre parêntesis depois do símbolo do grupo ou subgrupo.											

O IG pode ser calculado a partir da Equação 14:

$$IG = (F - 35) \times [0,2 + 0,005 (W_L - 40)] + 0,01 \times (F - 15) \times (IP - 10) \quad \text{Equação 14}$$

Em que F é a percentagem de passados no peneiro 0,075 mm.

A Figura 13 também pode ser utilizada para estimar o IG. A partir da determinação de um IG parcial pelo W_L e de outro IG parcial a pelo IP, esses IG parciais são somados, obtendo-se o IG final para o solo.

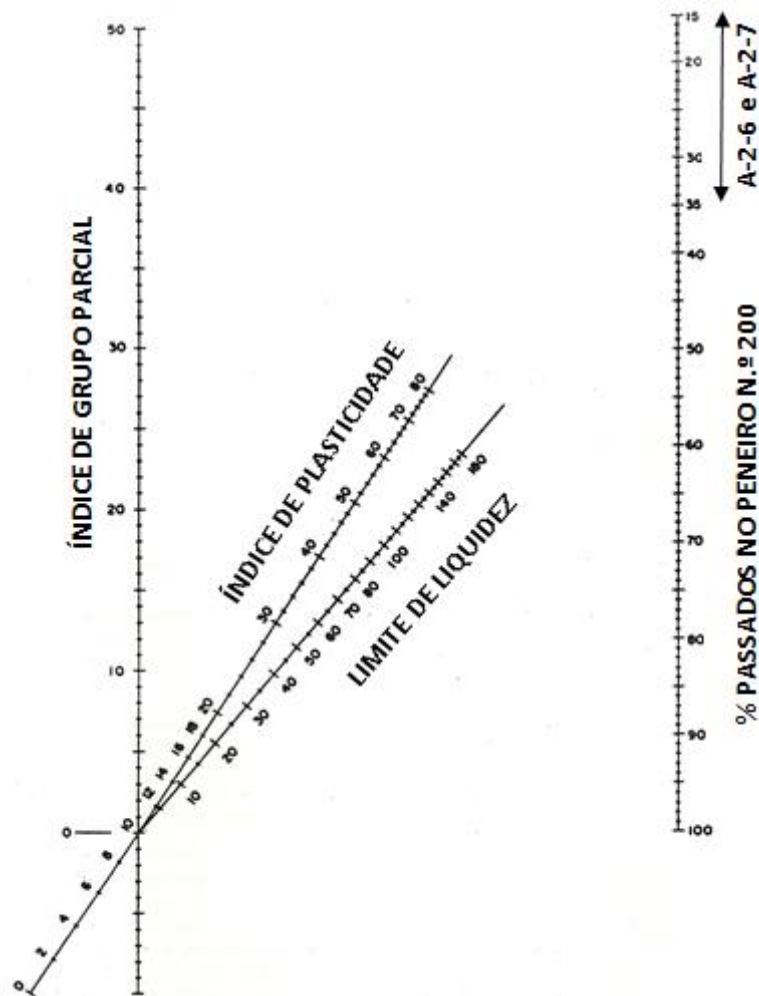


Figura 13 – Ábaco para determinar o Índice de Grupo (adaptado de AASHTO M 145).

No Quadro 9 são resumidas as principais características dos materiais que constituem cada um dos grupos e subgrupos desta classificação.

Quadro 9 – Propriedades dos grupos de solos da Classificação AASHTO (AASHTO M 145).

	Grupos e subgrupos	Características
Materiais granulares	A1	Mistura bem graduada de calhau ou seixo, areia grossa e fina, e um material aglutinante NP ou fracamente plástico. O grupo inclui também calhau, seixo, areia grossa, cinzas vulcânicas, etc., sem material aglutinante.
	A-1-a	Material predominantemente constituído por calhau ou seixo, com ou sem material aglutinante bem graduado.
	A-1-b	Material predominantemente constituído por areia grossa, com ou sem material aglutinante bem graduado.
	A-3	Areia fina de praia ou dunas, sem silte ou argila ou com uma quantidade muito pequena de silte NP. O grupo inclui também misturas de areia fina mal graduada e quantidades limitadas de areia grossa e seixo existentes em depósitos fluviais.
	A-2	Larga variedade de materiais granulares intermédios entre os dos grupos A-1 e A-3 e os dos grupos A-4, A-5, A-6 e A-7. Inclui todos os materiais contendo até 35% de partículas passadas no peneiro de 0,074 mm (n.º 200) ASTM que não possam ser classificados como A-1 ou A-3 devido ao valor elevado do teor em finos, do IP ou de ambos.
	A-2-4 e A-2-5	Vários materiais granulares contendo 35% ou menos de partículas passadas no peneiro de 0,074 mm (n.º 200) ASTM e em que a fração passada no peneiro de 0,420 mm (n.º 40) ASTM tem as características dos grupos A-4 e A-5. Incluem materiais como seixo e areia grossa com quantidade de silte e IP excessivos em relação aos limites do grupo A-1, e areia fina com quantidade de silte NP excessiva em relação ao aos limites do grupo A-3.
	A-2-6 e A-2-7	Materiais semelhantes aos descritos nos subgrupos A-2-4 e A-2-5, salvo a fração que passa no peneiro de 0,420 mm (n.º 40) ASTM, que tem as características dos grupos A-6 e A-7.
Materiais silto-argilosos	A-4	Solo siltoso NP ou moderadamente plástico, com 75% ou mais de partículas passadas no peneiro de 0,074 mm (n.º 200) ASTM. O grupo inclui também misturas de solo siltoso com areia e seixo retidos naquele peneiro, desde que estes não excedam 64% da mistura.
	A-5	Material semelhante ao descrito no grupo A-4, com a diferença de que é geralmente de carácter diatomáceo ou micáceo e pode ser altamente elástico (como o indica o alto W_L).
	A-6	Solo argiloso plástico, tendo usualmente 75% ou mais de partículas passadas no peneiro de 0,074 mm (n.º 200) ASTM. O grupo inclui também misturas de solo argiloso com areia e seixo retidos naquele peneiro, desde que estes não excedam 64% da mistura. Os materiais deste grupo têm usualmente grandes variações de volume entre os estados de seco e húmido.
	A-7	Material semelhante ao descrito no grupo A-6, com a diferença de possuir um alto W_L e poder ser elástico, assim como estar sujeito a grandes variações de volume.
	A-7-5	Materiais com IPs moderados em relação ao W_L e podem ser muito elásticos, assim como estarem sujeitos a consideráveis alterações de volume.
	A-7-6	Materiais com IPs elevados em relação ao W_L e sujeitos a alterações de volume extremamente grandes.

3.4. Classificação Francesa LCPC/SETRA

A partir das instruções dadas no guia técnico para a construção de aterros e leitos de pavimento (LCPC/SETRA, 1992) é possível efetuar outra classificação dos materiais para aterro.

Este documento fornece quatro pontos importantes:

- A classificação dos materiais para a construção de aterros e leitos dos pavimentos;
- As condições de utilização de materiais em aterro;
- As condições de utilização dos materiais em leito do pavimento;
- A compactação de aterros e leitos dos pavimentos.

Esta classificação permite a classificação de solos, mas também de materiais rochosos, solos orgânicos e subprodutos industriais.

3.4.1. Classificação de solos

Na classificação de solos são utilizados parâmetros de natureza, de estado hídrico e de comportamento mecânico (Quadro 10). A partir destes é possível determinar a classe e a subclasse do material a testar.

Quadro 10 – Descrição dos parâmetros utilizados na classificação de solos LCPC/SETRA (1992).

PARÂMETROS DE NATUREZA		
Parâmetros granulométricos	O $D_{máx}$ muito importante aquando da definição da espessura das camadas e da avaliação da possibilidade de mistura de ligantes. É também importante para avaliar a representatividade dos ensaios de laboratórios efetuados.	
	O valor de fronteira é 50 mm: Abaixo estão os solos finos, arenosos e cascalhentos (A, B, D1 e D2), suscetíveis de serem misturados com um ligante; Acima os solos constituídos pelos blocos C e D3.	
	% Passados no peneiro n.º 200	> 35% - O comportamento do solo é regido pela fração fina; 12% de passados é a fronteira entre os materiais arenosos e cascalhentos, pobres ou ricos em finos.
	% Passados no peneiro de 2 mm	70% de passados é a fronteira entre os materiais com tendência arenosa e os materiais com tendência cascalhenta.

Quadro 10. 1 - Descrição dos parâmetros utilizados na classificação de solos LCPC/SETRA (1992) (continuação).

PARÂMETROS DE NATUREZA		
Parâmetros de argilosidade	Índice de plasticidade – divide os solos em três grupos	IP ≤ 12 – solos pouco argilosos
		IP entre 12 e 25 – solos medianamente argilosos
		IP = 40 – fronteira entre os solos argilosos e muito argilosos
	Azul-de-metileno (MB)	Representa globalmente a quantidade e a atividade da fração argilosa. É a quantidade de azul-de-metileno que é adsorvida pelas partículas, está diretamente relacionada com a superfície específica das partículas.
		Divide o solo em seis grupos, que permitem distinguir a plasticidade de solos argilosos e siltosos e a sensibilidade à água: < 0,1 – o solo é insensível à água > 0,2 – o solo começa a manifestar sensibilidade à água 1,5 – limite que distingue solos arenosos com argila de solos arenosos com silte 2 – limite que distingue solos com siltes muito plásticos de medianamente plásticos 6 – limite que distingue solos siltosos de argilosos 8 – limite que distingue solos argilosos de muito argilosos
Equivalente de areia (EA)	Permite distinguir entre solos pouco e muito argilosos.	
PARÂMETROS DE ESTADO HÍDRICO		
<p>Avaliam a variação da consistência do material com o w.</p> <p>A classificação encontra-se dividida em cinco estados hídricos distintos:</p> <p>ts – muito seco</p> <p>s – seco</p> <p>m – humidade média</p> <p>h – húmido</p> <p>th – muito húmido</p>		
Parâmetros que se verificam:	Índice de capacidade de carga imediato - IPI	Para os estados húmido e muito húmido
	Razão entre o w e o w _{ot}	Para os estados seco e muito seco
	Índice de consistência - I _c	Para os solos finos e medianamente a muito argilosos

Quadro 10. 2 - Descrição dos parâmetros utilizados na classificação de solos LCPC/SETRA (1992) (continuação).

PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO MECÂNICO		
Coeficientes utilizados	Coeficiente de Los Angeles - LA	O valor de fronteira é 45
	Coeficiente micro-Deval em presença de água - MDE	
	Coeficiente de friabilidade de saibros - FS	O valor de fronteira é 60
Com base nos valores obtidos dividem-se os materiais em dois grupos:		
Materiais suscetíveis de resistir ao tráfego – podem ser utilizados em leito de pavimento		Materiais suscetíveis de fragmentarem e se transformarem em solos com excesso de finos – necessidade de tratamento de utilizados em leito de pavimento

3.4.2. Classificação de materiais rochosos

Nesta classificação os principais parâmetros intervenientes são os de estado hídrico e de comportamento mecânico.

Para além destes dois parâmetros, é ainda importante referir outros parâmetros que intervêm na classificação, nomeadamente:

- A natureza petrográfica da rocha;
- O comportamento do material rochoso desde a extração até à respetiva aplicação na camada e posterior compactação – produção de finos no caso de material friável (R1, R2), materiais sensíveis à água (R1, R2, R3), maior fragmentabilidade na colocação do material em obra pode originar grande permeabilidade em obra (R5), materiais mais ou menos solúveis (R5);
- As condições climáticas a que o material é exposto – chuva, frio, gelo e calor;

3.4.3. Classificação de solos orgânicos e subprodutos industriais

Estes materiais apresentam vantagens na sua utilização, sendo sustentáveis tanto para o ambiente, como em termos económicos.

Esta classificação divide os materiais em nove grupos distintos, em que para cada um dos grupos existe um ou mais parâmetros característicos.

3.5. Recomendações para a utilização do material em aterro e sua execução

A construção de um aterro implica o seguimento de um conjunto de regras e recomendações que servem para garantir uma boa aplicação dos materiais em obra. Caso se verifique o cumprimento destes requisitos, é esperado que o aterro, quando concluído, apresente um bom comportamento face aos esforços transmitidos.

Após o término dos trabalhos preparatórios para a construção (limpeza e desmatagem, decapagem, saneamento da fundação do aterro ou no leito de pavimento em escavação e proteção da vegetação existente), iniciam-se as operações de construção do aterro.

Um aterro pode ser constituído por seis zonas/estruturas (Figura 14):

- Fundação do aterro: terreno sobre o qual assenta o aterro a construir;
- Parte Inferior do Aterro – PIA: zona do aterro que assenta sobre a fundação. No caso de se ter procedido previamente aos trabalhos de decapagem, consideram-se também incluídas para além destas, as camadas que se situam abaixo do nível do terreno natural;
- Corpo: parte do aterro compreendida entre a PIA e a PSA;
- Parte Superior do Aterro – PSA: zona do aterro (40 - 85 cm) sobre a qual apoia a camada do leito do pavimento;
- Leito do pavimento: última zona constituinte do aterro, destina-se essencialmente a conferir boas condições de fundação ao pavimento, não só do ponto de vista das condições de serviço, mas também das condições de colocação em obra. Permite uma fácil e adequada compactação da primeira camada do pavimento e garante as condições de traficabilidade adequadas ao tráfego de obra. Por razões construtivas o Leito do Pavimento pode ser construído por uma ou várias camadas;
- Espaldar: zona lateral do corpo do aterro que inclui os taludes e que pode ocasionalmente ter função de maciço estabilizador.

A fundação do pavimento é constituída pela PSA e pelo leito do pavimento.

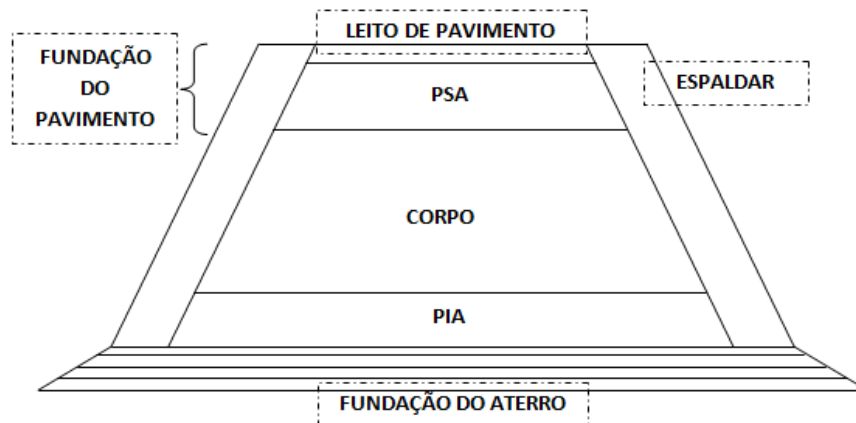


Figura 14 – Esquema ilustrativo da estrutura de um aterro (adaptado de LCPC/SETRA, 1992).

O leito do pavimento é uma zona de grande importância no comportamento global da estrutura. Destina-se essencialmente a conferir e uniformizar as condições de suporte do pavimento. A execução desta camada, que é obrigatória, visa atingir os seguintes objetivos:

A curto prazo:

- Nivelar a plataforma de modo a permitir a execução do pavimento;
- Garantir uma capacidade de suporte suficiente, independentemente das condições meteorológicas, para permitir uma correta execução do pavimento - compactação e regularidade das camadas;
- Proteger os solos da plataforma face às intempéries;
- Garantir boas condições de traficabilidade aos veículos de carga dos materiais utilizados na construção da primeira camada do pavimento.

A longo prazo:

- Homogeneização e manutenção da capacidade de suporte da fundação, independentemente das variações do estado hídrico dos solos ocorrentes ao nível da plataforma;
- Contribuição para a drenagem do pavimento.

A seguir são descritas as especificações do LNEC, as condições impostas no Caderno de Encargos da Estradas de Portugal e as recomendações da LCPC/SETRA, tanto para as características dos materiais para o aterro como para o Leito do Pavimento.

3.5.1. Especificações LNEC

Em seguida apresentam-se as especificações LNEC E 241:1971 para a aplicação de solos em terraplenagens e LNEC E 242:1971 para a execução de terraplenagens de estradas.

3.5.1.1. Especificação LNEC E 241:1971

Esta especificação destina-se a dar indicações sobre os materiais a utilizar na execução de aterros e de leitos do pavimento. Assim, e segundo esta especificação, os materiais devem apresentar as seguintes características:

- Não devem conter folhas, troncos, ramos, raízes, capim, lixo ou quaisquer outros detritos orgânicos;
- Devem ser classificados nos grupos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 ou A-3. No entanto, se não for possível obter esses materiais, podem ser utilizados os dos grupos A-2-6, A-2-7, A-4, A-5, A-6 ou A-7 (desde que sejam tomadas as devidas precauções no projeto e execução do aterro, quanto à sua distribuição, compactação e drenagem, especialmente em relação aos solos dos grupos A-6 e A-7);
- Os materiais xistosos, os muito alteráveis ou aqueles que contêm pedra demasiadamente branda, podem ser utilizados em aterros desde que se tomem as devidas precauções baseadas em estudo especial e/ou se tenha em conta o seu comportamento em obras anteriores na região.

Como se pode constatar, estas recomendações são um pouco vagas, pois não têm em conta o tipo de argila, nem o seu comportamento na presença de água, contemplando apenas a quantidade de materiais finos presentes no solo.

3.5.1.2. Especificação LNEC E 242:1971

A presente especificação estabelece um guia para a execução de aterros. Considera todos os processos desde as operações de desmatação do terreno, à escavação de plataformas, até à realização do próprio aterro e respetiva compactação.

Descreve ainda os procedimentos para a construção de um aterro experimental. Este permite um melhor aproveitamento do equipamento de compactação disponível, assim como a determinação dos valores mais convenientes para o número de passagens dos cilindros, o W do solo e a espessura das camadas.

A construção do aterro deve respeitar os seguintes princípios:

- Os materiais para o aterro devem satisfazer a Especificação LNEC E 241:1971;
- Na preparação da superfície em que assenta o aterro deve-se assegurar a ligação ao material de aterro, no caso de superfícies inclinadas;
- Se a espessura do aterro a construir sobre o terreno natural ou terraplenagens já existentes for inferior a 30 cm, a respetiva superfície deve ser escarificada, regularizada e recompactada até à baridade definida para o aterro;
- Se a superfície do terreno natural estiver encharcada e não suporte o peso dos equipamentos, a camada inferior deve ser constituída por materiais granulares e ter apenas espessura suficiente para suportar o peso dos equipamentos. A construção prossegue compactando-se as camadas até à baridade especificada;
- Os solos devem ser aplicados por ordem crescente de qualidade e a partir da base. Quando for prevista a utilização de material rochoso, este deve ser colocado na base do aterro. Enche-se os vazios com material mais fino e compacta-se em seguida, criando-se assim um solo-enrocamento. Para impedir o arrastamento de solo das camadas superiores para a camada rochosa, constrói-se uma camada de material com granulometria adequada. Pode-se aplicar geotêxtil, esperando-se o mesmo efeito;
- Caso não se realize um aterro experimental, a espessura das camadas não deve exceder, em regra, os 20 cm antes da compactação. O material pode conter pedras ou calhaus, desde que a sua quantidade não prejudique as operações de construção e controlo;
- Os aterros junto a aquedutos ou outras estruturas devem ser cuidadosamente executados e compactados por forma a atingir os valores da baridade especificada para o conjunto do aterro.

No Quadro 11 estão os valores mínimos do GC para os grupos de solos da Classificação AASHTO.

Quadro 11 – Valores mínimos do grau de compactação, em função da classificação do solo (adaptado de LNEC E 242:1971).

Classificação do solo	Compactação relativa mínima (%)		
	Altura dos aterros		Leito do Pavimento
	< 15 m	> 15 m	
A-1	95	95	100
A-3	100	100	100
A-2-4 e A-2-5	95	95	100
A-2-6 e A-2-7	90	(a)	95
A-4, A-5, A-6 e A-7	90	(a)	95
(a) Valor sujeito a estudo prévio, devendo a construção dos aterros ter cuidados especiais.			

3.5.2. Recomendações LCPC/SETRA

Esta recomendação tem como objetivo garantir que as condições de aplicação dos materiais sejam as mais corretas. Isto é, procura-se ajustar a aplicação destes materiais face às condições do local, às técnicas e equipamentos utilizados, de modo a obtenção de um nível de qualidade adequado, considerando os custos médios das técnicas e dos materiais utilizados (Quadro 12).

Quadro 12 – Resumo das condições de utilização dos materiais em aterro (adaptado de LCPC/SETRA, 1992).

Item	Condições de utilização	Código
E – Extração	Nenhuma condição particular a recomendar	0
	Extração em camadas (0,1 a 0,3 m): permite uma boa fragmentação e uma gama de diferentes camadas de materiais	1
	Extração frontal: permite a escolha, no caso de formações estratificadas, da melhor camada para a circulação de veículos de carga	2
G – Granulometria	Nenhuma condição particular a recomendar	0
	Elimina as partículas com dimensões superiores a 800 mm	1
	Elimina as partículas com dimensões inferiores a 250 mm	2
	Fragmentação complementar após a extração	3
W – Teor em água	Nenhuma condição particular a recomendar	0
	Aeração das camadas para reduzir o teor em água	1
	Secagem por colocação em depósito provisório	2
	Rega para manter o estado	3
	Humidificação para mudar o estado	4
T – Tratamento	Nenhuma condição particular a recomendar	0
	Tratamento com um reagente ou um aditivo adaptado	1
	Tratamento com cal simples	2
R – Espalhamento	Nenhuma condição particular a recomendar	0
	Camadas finas (20 a 30 cm)	1
	Camadas médias (30 a 50 cm)	2
C – Compactação	Compactação intensa	1
	Compactação média	2
	Compactação fraca	3
H – Altura do aterro	Nenhuma condição particular a recomendar	0
	Aterro de baixa altura (≤ 5 m)	1
	Aterro de média altura (≤ 10 m)	2

Consultando as tabelas de condições de utilização de materiais em aterro, visando o código correspondente ao solo, é possível saber qual o procedimento a ter como o material.

Quanto às condições de aplicação dos materiais no leito do pavimento, é de notar o Quadro 13. Os critérios que esta recomendação procura satisfazer são a dimensão dos elementos mais grossos, a insensibilidade à água e a resistência à circulação dos equipamentos de obra.

Quadro 13 - Resumo das condições de utilização dos materiais em leito do pavimento (adaptado de LCPC/SETRA, 1992).

Itens	Condições de utilização	Código
G - Granulometria	Nenhuma condição particular a recomendar	0
	Eliminação da fração 0/d sensível à água	1
	Eliminação da fração grossa – permite uma mistura correta do solo	2
	Eliminação da fração grossa – permite a regularização da plataforma	3
	Eliminação da fração 0/d sensível à água e da fração grossa – permite a regularização da plataforma	4
	Fragmentação da fração grossa para a obtenção de finos	5
W – Teor em água	Nenhuma condição particular a recomendar	0
	Rega para manter o estado hídrico	1
	Humidificação para alterar o estado hídrico	2
T - Tratamento	Nenhuma condição particular a recomendar	0
	Tratamento com ligante hidráulico	1
	Tratamento com ligante hidráulico e eventualmente com cal	2
	Tratamento misto – cal com ligante hidráulico	3
	Tratamento com cal	4
	Tratamento com ligante hidráulico e eventual correção granulométrica	5
	Tratamento de correção granulométrica	6
S – Proteção superficial	Nenhuma condição particular a recomendar	0
	Revestimento de cura eventualmente com gravilha	1
	Revestimento de cura com gravilha eventualmente incrustado	2
	Camada final de regularização	3

3.5.3. Recomendações do Caderno de Encargos da Estradas de Portugal (EP)

Após a construção de um aterro, este deve apresentar uma quase imediata estabilidade. Os materiais usados devem ter características geotécnicas que permitam atingir as resistências que garantam esta exigência.

O Caderno de Encargo da EP determina que os materiais a aplicar na construção de aterros cumpram os seguintes pressupostos:

- Os materiais a utilizar deverão estar isentos de ramos, folhas, troncos, raízes, ervas, lixo ou quaisquer detritos orgânicos;
- A dimensão máxima dos elementos dos materiais a aplicar será, em regra, não superior a 2/3 da espessura da camada, uma vez compactada;
- O $D_{máx}$ dos seus elementos permita o nivelamento das camadas e que a sua espessura seja compatível com a potência dos cilindros utilizados;
- O respetivo W seja adequado às condições de colocação em obra.

Quando for imprescindível, por razões económicas e/ou ambientais, reutilizar solos coerentes (finos e sensíveis à água) com elevados teores em água no seu estado natural, poder-se-á recorrer a técnicas de tratamento (*in situ* ou em central) com ligantes hidráulicos, por forma a garantir condições de traficabilidade aos equipamentos e a atingir as condições exigíveis para a sua colocação em obra.

Os materiais a utilizar na construção dos aterros são, do ponto de vista granulométrico, os seguintes: solos, materiais rochosos (enrocamento) e materiais do tipo solo-enrocamentos.

Podem ser aplicados os solos que cumpram as seguintes condições:

- Material retido no peneiro de 19 mm (3/4'') ASTM - $\leq 30\%$;
- Solos incoerentes - $0,8 W_{otm} \leq W \leq 1,2 W_{otm}$;
- Solos coerentes - $0,7 W_{otn} \leq W \leq 1,4 W_{otn}$;

Em que:

- W_{otm} - teor em água ótimo referido ao ensaio de Proctor Modificado;
- W_{otn} - teor em água ótimo referido ao ensaio de Proctor Normal;

Apresentam-se no Quadro 14 as cinco classes de solo que se aplicam em diferentes partes do aterro. Estas baseiam-se na Classificação Unificada dos Solos e dependem, ainda, do valor do CBR do solo.

Quadro 14 – Utilização dos solos descrita no Caderno de Encargos da EP (EP, 2009).

Classe	CBR (%)	Grupo	Descrição do solo	Reutilização		
				PIA	Corpo	PSA
S0	<3	OL	Siltes orgânicos e siltes argilosos de baixa plasticidade. (1)	N	N	N
		OH	Argilas orgânicas de plasticidade média a elevada; Siltes orgânicos. (2)	N	P	N
		CH	Argilas inorgânicas de plasticidade elevada; Argilas gordas. (3)	N	P	N
		MH	Siltes inorgânicos; Areias finas micáceas; Siltes micáceos. (4)	N	P	N
S1	≥3 a <5	OL	Idem (1)	N	S	N
		OH	Idem (2)	N	S	N
		CH	Idem (3)	N	S	N
		MH	Idem (4)	N	S	N
S2	≥5 a <10	CH	Idem (3)	N	S	N
		MH	Idem (4)	N	S	N
		CL	Argilas inorgânicas de plasticidade baixa a média; Argilas com seixo, argilas arenosas, argilas siltosas e argilas magras.	S	S	P
		ML	Siltes inorgânicos e areias muito finas; Areias finas, siltosas ou argilosas; Siltes argilosos de baixa plasticidade.	S	S	P
		SC	Areia argilosa; Areia argilosa com cascalho. (5)	S	S	P
S3	≥10 a <20	SC	Idem (5)	S	S	S
		SM d	Areia siltosa;	S	S	S
		SM u	Areia siltosa.	P	S	N
		SP	Areias mal graduadas; Areias mal graduadas com cascalho.	S	S	S
S4	≥20 a <40	SW	Areias bem graduadas; Areias bem graduadas com cascalho.	S	S	S
		GC	Cascalho argiloso; Cascalho argiloso com areia.	S	S	S
		GM u	Cascalho siltoso; Cascalho siltoso com areia. (6)	P	S	P
		GP	Cascalho mal graduado; Cascalho mal graduado com areia. (7)	S	S	S
S5	≥40	GM d	Idem (6)	S	S	S
		GP	Idem (7)	S	S	S
		GW	Cascalho bem graduado; Cascalho bem graduado com areia.	S	S	S

N – Não admissível; P – Possível; S - Admissível

Na (PIA) devem ser utilizados solos pouco sensíveis à água (S2, S3, S4 e S5). Quando os aterros se localizam em zonas muito húmidas, inundáveis ou integram camadas drenantes, estas e/ou a PIA, devem ser construídas com materiais com menos de 5% passados no peneiro de 0,075 mm (n.º 200) ASTM. No Corpo dos aterros podem ser utilizados os solos de pior qualidade e na PSA, numa espessura entre 40 a 85 cm, devem utilizar-se os solos com melhores características geotécnicas. Estes materiais devem pertencer simultaneamente às classes S2, S3, S4 ou S5 e aos grupos A-1, A-2 ou A-3 da Classificação AASHTO.

Os materiais que constituem o leito do pavimento são divididos em:

- Solos;
- Materiais granulares não britados;
- Materiais granulares britados.

Quando as condições técnico-económicas e ambientais o justificarem, podem ainda ser utilizados solos tratados com cimento ou com cal e/ou cimento.

No Quadro 15 estão apresentadas as características dos solos que podem ser aplicados como leito do pavimento. Estes devem ser constituídos por materiais de boa qualidade, sem detritos, matéria orgânica ou quaisquer outras substâncias nocivas.

Quadro 15 – Características do solo a aplicar no leito do pavimento (adaptado de EP, 2009).

Características dos solos	Valor limite
$D_{m\acute{a}x}$	75 mm
% de material passado no peneiro n.º 200 ASTM	$\leq 20\%$
W_L	$\leq 25\%$
IP	$\leq 6\%$
Equivalente de areia (EA)	$\geq 30\%$
Valor de azul-de-metileno (MB)	$\leq 2,0$
CBR a 95% (Proctor Modificado)	$\geq 10\%$
Expansibilidade (CBR)	$\leq 1,5\%$
% de matéria orgânica (%MO)	0%

Quanto aos materiais granulares não britados, estes devem cumprir os seguintes requisitos (Quadros 16 e 17):

Quadro 16 – Fuso granulométrico para os materiais granulares não britados (EP, 2009).

PENEIRO ASTM	% ACUMULADA DO MATERIAL QUE PASSA
75,0 mm (3")	100
63,0 mm (2 1/2")	90 - 100
4,75 mm (n.º 4)	35 - 70
0,075 mm (n.º 200)	0 - 12

Quadro 17 - Características dos materiais granulares não britados a aplicar no Leito do Pavimento (adaptado de EP, 2009).

Características dos materiais granulares não britados	Valor limite
W _L	≤ 25%
IP	≤ 6%
Equivalente de areia (EA)	≥ 30%
Valor de azul-de-metileno (MB)	≤ 2,0
Perda por desgaste na máquina de <i>Los Angeles</i> (LA)	≤ 45%

Em relação aos materiais granulares britados, estes devem ser produzidos a partir de material explorado em formações homogéneas e serem isentos de argilas, de matéria orgânica ou de quaisquer outras substâncias nocivas.

Devem cumprir os seguintes requisitos (Quadros 18 e 19):

Quadro 18 - Fuso granulométrico para os materiais granulares britados (EP, 2009).

PENEIRO ASTM	% ACUMULADA DO MATERIAL QUE PASSA
37,5 mm (1 1/2")	100
31,5 mm (1 1/4")	75 - 100
19,0 mm (3/4")	55 - 85
9,51 mm (3/8")	40 - 70
6,3 mm (1/4")	33 - 60
4,75 mm (n.º 4)	27 - 53
2,00 mm (n.º 10)	22 - 45
0,425 mm (n.º 40)	11 - 28
0,180 mm (n.º 80)	7 - 19
0,075 mm (n.º 200)	2 - 10

Quadro 19 - Características dos materiais granulares britados a aplicar no Leito do Pavimento (adaptado de EP, 2009).

Características dos materiais granulares britados	Valor limite
% de material retido no peneiro de 19 mm (3/4") ASTM	≤ 30%
% de desgaste na máquina de <i>Los Angeles</i> (LA)	≤ 45% (a)
W _L	≤ 25%
IP	≤ 6%
Equivalente de areia (EA)	≥ 30%
Valor de azul-de-metileno (MB)	≤ 2,0
(a) 50% em granitos.	

Tanto para os materiais granulares não britados como para os britados, estas duas condições devem verificar-se:

- Se o valor do equivalente de areia for inferior a 30%, o valor de azul-de-metileno corrigido (MB_c), deverá ser inferior a 35%, sendo calculado pela Equação 15:

$$MB_c = MB \times \frac{\%P\#200}{\%P\#10} \times 100 \quad \text{Equação 15}$$

- Se a percentagem de material passado no peneiro de 0,075 mm (n.º200) ASTM for inferior ou igual a 5%, a aceitação do material passa unicamente pelo valor do LA, desde que FR <7 e ALT >20. Em que FR consiste no Índice de Fragmentabilidade e ALT consiste no Índice de Alterabilidade.

4. Métodos e equipamentos de compactação

4. Métodos e equipamentos de compactação

4.1. Introdução

Os equipamentos de compactação destinam-se a efetuar a operação de compactação, por processos mecânicos de adensamento dos solos.

Como foi referido no capítulo anterior, é importante considerar determinados aspetos no processo da compactação, nomeadamente na utilização dos equipamentos:

- Muitas vezes, devido às variações climáticas, existe a necessidade de retificar o W do solo *in situ*, de modo a obter-se o W_{ot} . Sem este fator, independentemente da energia de compactação aplicada pelo equipamento, não se conseguirá atingir o $\gamma_{d, máx}$;
- A espessura da camada adotada, em função do equipamento usado, deve garantir a respetiva homogeneidade, isto é, a mesma densidade em toda a massa de solo. O solo deve estar, sempre que possível, livre de torrões muito secos, blocos ou fragmentos de rocha;
- O número de passagens com o equipamento deve ser tal que não influencie no custo do serviço nem no seu tempo de execução. Deve-se aplicar o menor número de passagens que conduza ao γ_d máximo, para um W_{ot} . Este fator depende de cada equipamento;
- As características dos equipamentos de compactação, como a pressão, a área de contacto cilindro/solo, vibração aplicada, entre outras, são de grande importância para a obtenção do resultado desejado.

A energia de compactação pode ser aplicada no terreno pelo equipamento por quatro métodos diferentes (Caterpillar, 2009):

- Pressão estática;
- *Kneading* ou manipulação;
- Vibração;
- Impacto.

Os principais equipamentos utilizados na compactação de solos são:

- Cilindros de pés de carneiro;
- Cilindros de pneus;
- Cilindros de rolos lisos;
- Cilindros vibradores;
- Rolos de impacto.

4.2. Equipamentos de compactação mais utilizados

4.2.1. Cilindros de pés de carneiro

Estes equipamentos existem no mercado com pesos entre as 3 e as 40 tf e podem ser puxados por tratores ou autopropulsionados.

São constituídos por um cilindro metálico e dispõem, na face exterior, de saliências colocadas em filas desencontradas (Figura 15). As pressões obtidas variam de 17 kg/cm² para os cilindros vazios, a 27 e 41 kg/cm² para cilindros cheios de água e de areia.



Figura 15 - Cilindro de pés de carneiro (<http://xml.catmms.com>).

As características mais importantes destes cilindros são o seu peso e a pressão transmitida por cada “pé”.

Estes compactadores são ideais para solos argilosos pois evitam a “laminação”, ou seja, a tendência para, à medida que o número de passagens do equipamento aumenta, o aterro se divida em “lâminas”. Quando são utilizados cilindros de pneus ou de rasto liso este fenómeno pode ocorrer, provocando um decréscimo na resistência global do aterro (uma vez que se encontra dividido por superfícies horizontais de baixa resistência) e um acréscimo drástico do coeficiente de permeabilidade horizontal do solo.

A espessura das camadas de solo compactado varia entre 10 e 30 cm, para um número de passagens que varia entre 4 e 6.

Quando este cilindro penetra a certa profundidade na camada solta, a movimentação em baixa velocidade permite a aplicação de menos energia de compactação. Com o adensamento do solo, os pés do cilindro vão penetrando cada vez menos e a resistência ao rolamento diminui, permitindo o uso de maiores velocidades e de menor força de tração.

4.2.2. Cilindros de pneus

Estes cilindros podem atingir as 200 tf e são rebocados ou autónomos, com dois eixos de rodas compactadoras (Figura 16).



Figura 16 - Cilindro de pneus (<http://www.nationwideequipment.com>).

Pode-se variar a carga transmitida ao pneu pela utilização de balastro dentro de um contentor apropriado. Em alguns modelos os pneus estão colocados lado a lado em número tal que uma cobertura completa da camada a compactar é conseguida com uma só passagem.

Fatores como a área de contacto com o solo e a pressão transmitida são importantes para a compactação e são em função da carga transmitida por pneu e da pressão do ar no seu interior. Não são indicados para solos argilosos plásticos, mas para solos constituídos desde areias limpas a argilas siltosas magras, até camadas de 40 cm de espessura.

Este equipamento permite uma compactação mais rápida e económica do que a realizada com cilindros de pés de carneiro (Fernandes, 2004).

4.2.3. Cilindros de rolos lisos

São cilindros metálicos de superfície lisa, cujo peso é muito elevado pelo que não pode ser rebocado. O peso do rolo pode variar pela introdução de lastro dentro do cilindro (o lastro pode ser água e areia), conforme o peso desejado.

Estes equipamentos são utilizados na compactação de cascalho grosso a cascalho de pequeno calibre, terras saibrosas, em pequenas espessuras (menores que 15 cm), e tapetes betuminosos. Tem a desvantagem de haver uma pequena superfície de contacto com o material a compactar.

4.2.4. Cilindros vibradores

Estes cilindros vibradores podem ser dos três tipos apresentados anteriormente, existindo acoplados às unidades compactadores um vibrador (Figura 17).



Figura 17 - Cilindro de rolos lisos vibradores (<http://www.volvoce.com>).

Nestes cilindros, a vibração é de grande importância no sucesso da compactação. Permite aumentar a eficiência da compactação em profundidade, podendo as camadas atingir espessuras entre 0,6 e 0,8 m.

Apresentam algumas desvantagens:

- Não compactam próximo à superfície da camada, o que requer um acabamento com o cilindro de rolo liso ou o cilindro de pneus;
- Podem produzir uma segregação vertical quando há excesso de finos, em que as partículas de maiores calibres descem; este efeito é pouco acentuado em solos com uma boa distribuição granulométrica.

Para uma vibração adequada, é exigida força suficiente (peso próprio mais força vibratória) e determinadas amplitudes e frequências (Figura 18). Não existem cilindros com altas amplitudes e altas frequências, nem o contrário.

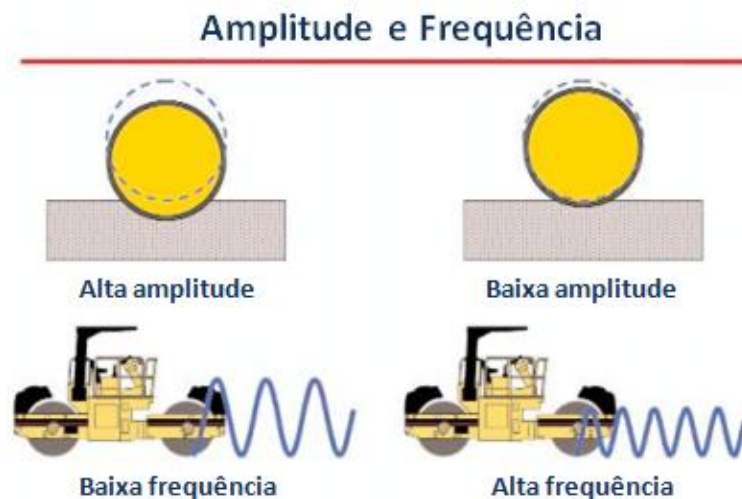


Figura 18 - Representação do efeito de diferentes frequências e amplitudes num cilindro vibrador (adaptado de <http://www.huntraco.hu>).

As relações entre o peso dos cilindros, as suas frequências e o tipo de material a compactar pode ser a seguinte:

- Cilindros de peso elevado e com baixas frequências - aconselháveis para cascalhos e enrocamentos;
- Cilindros de peso reduzido a médio e altas frequências - apropriados para areias e siltes.

4.2.5. Rolos de impacto

O uso destes equipamentos tem vindo a crescer nos últimos 20 anos. A sua aplicação pode ser equiparada à técnica de compactação dinâmica e são utilizados em grandes obras, como obras rodoviárias e aeroportos (Figura 19).



Figura 19 - Rolo de impacto (<http://www.jupitermines.com>).

O seu uso está limitado devido ao recurso a pequenas espessuras de camadas e à grande utilização de outros equipamentos mais convencionais, como os já mencionados cilindros.

Apresentam muitas aplicações, podendo ser aplicados em diversos tipos de solos e condições de terreno, desde solos argilosos, areias, cascalho a fragmentos de rocha e material proveniente de demolições (escombros) (Avalle, 2004).

O melhoramento da densidade e resistência das camadas depende da espessura das camadas, do tipo de material utilizado, das condições de humidade e presença de água subterrânea:

- Espessuras de 1 a 2 m em solos argilosos;
- Espessuras de 2 a 3 m em areias e escombros.

4.3. Controlo contínuo da compactação

Atualmente existe uma tendência para a redução dos ensaios convencionais pontuais (referidos no capítulo seguinte), sendo estes substituídos pelo controlo contínuo da compactação (CCC).

Este é um sistema de compactação inteligente que interpreta as várias interações entre o solo e o equipamento de compactação. Utiliza a informação recolhida pelo sistema para adaptar continuamente o desempenho do equipamento, de modo a otimizar a compactação e alcançar as condições definidas. O sistema controla os diferentes parâmetros do rolo de compactação, como a vibração, amplitude, frequência e velocidade (Figura 20) (Briaud & Seo, 2003).

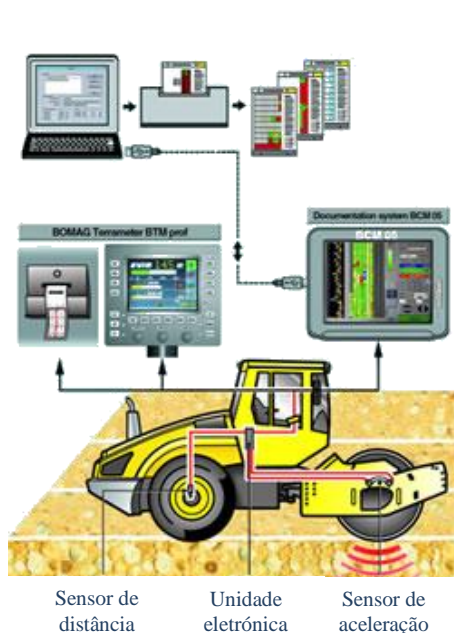


Figura 20 – Figura ilustrativa de um equipamento de CCC e dos sistemas integrados que permitem a otimização do processo da compactação (adaptado de: <http://www.menainfra.com/article/Polygonal-drum-for-deep-compaction/>).

Esta técnica apresenta como principais vantagens (Correia & Brandl, 2001):

- O controlo contínuo, permanente e documentado de toda a área tratada;
- A realização simultânea da operação de compactação com o seu controlo, não causando atrasos nem impedimentos nos trabalhos de construção;
- A remediação de pontos fracos na camada e a prevenção da sobrecompactação, que provocaria danos nas camadas superficiais;
- Uma compactação muito uniforme com menos passagem do rolo;
- Uma redução do número de ensaios convencionais de controlo;
- O alcance de maiores profundidades que os outros métodos de controlo, podendo chegar a mais de 1,5 m.

4.4. Seleção dos equipamentos

No processo da escolha dos equipamentos para a realização das operações de compactação, devem ser analisados todos os fatores relevantes para o processo, nomeadamente:

- Os **fatores naturais**, tais como o tipo de solo, a topografia, a presença de nível freático e o clima, são essenciais na determinação das condições no local de trabalho;
- Os **fatores de projeto**, os quais englobam a energia de compactação aplicada para atingir os valores de densidade desejados. O volume de terra a ser movimentada, as distâncias de percurso, as rampas e as dimensões das plataformas, para além dos planos existentes para trabalhos futuros, também devem ser observados;
- Os **fatores económicos** são de grande importância. Determinam a disponibilidade dos equipamentos e, basicamente, resumem-se ao custo unitário do trabalho.

Devem ser, então, escolhidos aqueles equipamentos que executem as operações com maior rapidez e menor esforço, e que conduzam ao menor custo unitário.

A Figura 21 demonstra que para uma variação da graduação do material a compactar, desde um material rochoso, 100% areia ou 100% argila, existe um determinado tipo de equipamento, para o qual a sua aplicação é mais eficiente e económica.

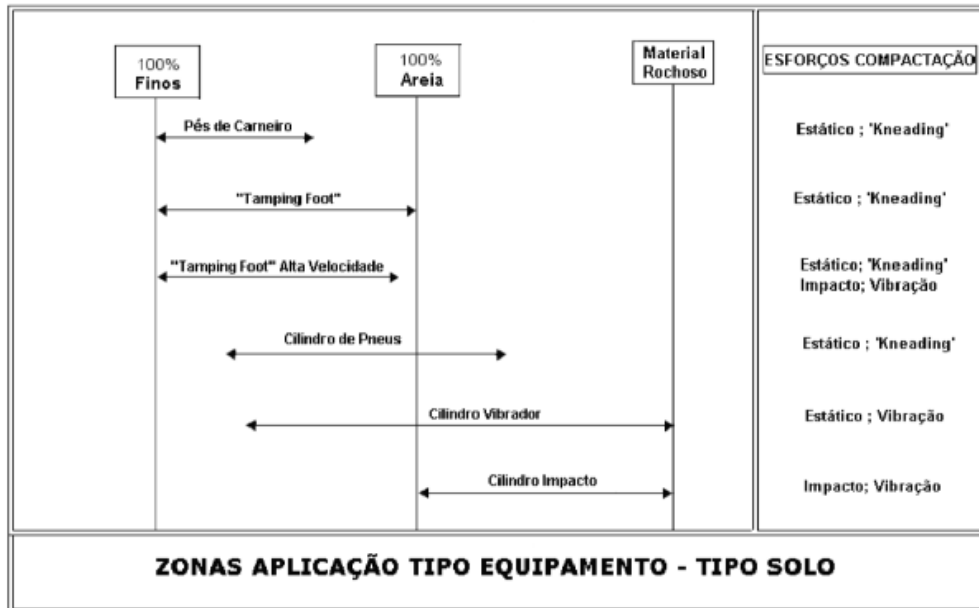


Figura 21 – Esquema demonstrativo da variação do tipo de material a compactar e equipamentos a aplicar (Ribeiro, 2008).

4.5. Operações para a correção do teor em água ótimo

Como já foi referido neste capítulo, muitas das vezes pode haver a necessidade de se corrigir o teor em água do solo a compactar. Este pode ocorrer quer por se verificar que o solo está demasiado seco ou com excesso de humidade.

Na hipótese de o solo encontrar-se com um W inferior ao W_{ot} obtido pelo ensaio de Proctor, deve-se proceder à irrigação do terreno.

Este processo realiza-se com recurso a um camião cisterna, provido de uma bomba hidráulica e aspersores na parte traseira para a regulação do caudal e pressão da água libertada, de modo a garantir um W homogéneo em toda a extensão do terreno (Figura 22).

Previamente é realizado um estudo para determinar a quantidade de água a aplicar no solo.



Figura 22 – Regulação do teor em água com recurso a um camião cisterna (LCPC/SETRA, 1992).

Também é possível com a aplicação de cal aumentar o teor em água do solo. Ao misturar a cal com o solo ocorrem reações químicas que provocam a aglutinação das suas partículas e modificações das suas características geotécnicas.

À medida que o teor da cal aumenta, diminui o $\gamma_{d, \text{máx}}$ e aumenta o W_{ot} , assim a curva de compactação adquire uma concavidade sucessivamente menor, sendo a importância da cal mais significativa no ramo seco da curva de compactação.

No ramo húmido, o $\gamma_{d, \text{máx}}$ do solo estabilizado é semelhante ao $\gamma_{d, \text{máx}}$ do solo natural. Com a aplicação de cal consegue-se um grau de compactação muito maior, pois o $\gamma_{d, \text{máx}}$ é menor.

Determinados fatores levam às reações de hidratação entre a cal e o solo, como a evaporação devida ao calor de hidratação, a evaporação provocada pela exposição ao ar durante a execução da mistura e a adição de uma determinada quantidade de material seco (Neves, 1993).

O espalhamento da cal pode realizar-se com recurso a equipamento do tipo *pulvimixer* para o caso de grandes áreas e para pequenas áreas a distribuição da cal pode ser manual (Figura 23).



Figura 23 – Redução do teor em água do solo com cal (LCPC/SETRA, 1992).

Caso de verifique que o solo ainda apresenta um W superior ao W_{ot} é necessário o seu arejamento. Isto é, procede-se à escarificação da camada de solo a tratar, expondo-o ao sol e ao vento, ou coloca-se o solo numa zona em que possa ser seco.

4.6. Outros métodos de compactação

Para além dos métodos de compactação já referidos existem outros processos de adensamento dos solos. Esses processos são a vibroflutuação e a compactação dinâmica e aplicam-se quer em obras de terra, isto é, a aterros artificiais, quer a maciços naturais.

Os métodos de compactação referidos atuam em profundidade, melhorando significativamente terrenos de areias soltas em zonas sísmicas, de modo a precaver a ocorrência do fenómeno da liquefação (Fernandes, 2004).

4.6.1. Vibroflutuação

O processo da vibroflutuação consiste na redução do índice de vazios do material à custa da expulsão da água. É introduzido no solo um equipamento vibrador (*vibroflot*), cujo peso pode atingir as 2 t. Este processo pode ser realizado só com recurso a vibração ou com recurso a vibração com substituição do solo (Figura 24).

Os seus efeitos podem atingir os 60 m de profundidade. São atingidas compacidades relativas na ordem dos 99%.

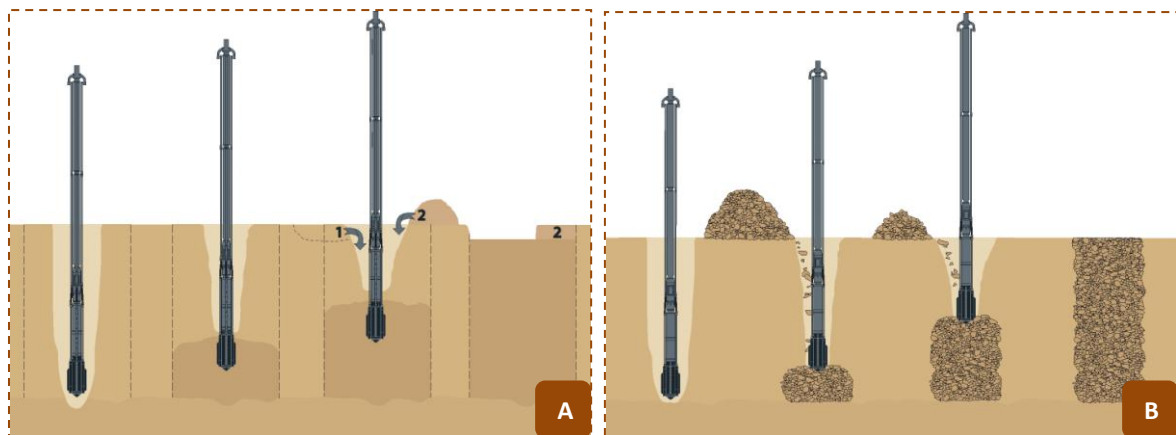


Figura 24 - A: Vibroflutuação com deslocamento do solo; B: Vibroflutuação com substituição do solo (<http://www.ice-holland.com/content/482/Technology/Vibroflots/>).

A vibroflutuação com deslocamento do solo é aplicada em solos com menos de 10 a 15% de sílica. O equipamento é suspenso numa grua móvel e através do seu peso e injeção de água sob pressão ocorre a cravação. Após se atingir a profundidade desejada é interrompida a injeção de água e dá-se início à subida do vibrador, que compacta fortemente o solo na sua vizinhança.

À superfície forma-se uma depressão que durante a subida do vibrador vai sendo preenchida por solo (Figura 24A). As profundidades mais correntes de cravação do vibrador oscilam entre os 4 e os 10 m.

A vibroflutuação com substituição do solo é aplicada em solos com mais de 15% de sílica. À superfície forma-se uma depressão que durante a subida do vibrador vai sendo alimentada por material granular. Resulta assim uma “coluna” fortemente compactada com um diâmetro que depende das características do solo mas que em regra é de três a quatro vezes o diâmetro do vibrador (Figura 24B).

4.6.2. Compactação dinâmica

O método da compactação dinâmica consiste em compactar o solo através do impacto provocado pela queda de um peso (Figura 25). Estes pesos são constituídos por blocos de betão ou por caixas espessas de aço preenchidas por betão ou areia. O seu peso pode variar entre as 5 e as 200 t e a altura de queda entre os 10 e os 40 m.



Figura 25 - Compactação dinâmica de área extensa
(http://www.menardbachy.com.au/dynamic_compaction.php).

Apenas é viável a sua aplicação em solos com poucos finos, uma vez que a permeabilidade dos solos contendo uma percentagem significativa de finos é demasiado baixa para permitir uma rápida drenagem das pressões neutras após a fluidificação devido à vibração. Por outro lado, a estrutura desses solos é mais dificilmente destruída devido à coesão conferida pelas partículas finas.

A técnica foi desenvolvida para o tratamento de áreas extensas e com profundidades de melhoramento até 40 m. Só pode ser usada em locais relativamente afastados de edificações pelos efeitos prejudiciais que as vibrações produziram nas estruturas e acabamentos (Fernandes, 2004).

4.7. Recomendações para as operações de compactação

Neste ponto são descritas recomendações para a realização da compactação, quer em aterros como em leitos do pavimento, segundo o LCPC/SETRA e o Caderno de Encargos da EP.

O LCPC/SETRA elaborou um guia que descreve as condições de compactação para aterros e leitos do pavimento. Num aterro, fundamentalmente no Corpo do Aterro, o objetivo é limitar os assentamentos. Enquanto no leito do pavimento o objetivo consiste em garantir as características de rigidez e resistência.

Quanto à compactação, esta deve ser fraca em materiais húmidos, para evitar a sua saturação, e intensa para materiais secos.

O Quadro 20 resume a relação Solo – Compactador, da LCPC/SETRA. E foi determinado a partir de análises experimentais para um grande número de trechos em obra, com medidas precisas e repetidas do peso específico e ajustados por um modelo matemático baseado nesses resultados. Este quadro foi determinado de forma a atingirem-se os valores mínimos característicos do γ_d , médio de toda a camada compactada e do γ_d no fundo da camada (γ_{dfc}) em aterro e do leito do pavimento:

Aterro:

- $\gamma_{d, \text{médio}}$ maior que 95 % do γ_d para o W_{ot} ;
- γ_{dfc} maior que 92 % do γ_d para o W_{ot} ;

Leito do pavimento:

- $\gamma_{d, \text{médio}}$ maior que 98,5 % do γ_d para o W_{ot} ;
- γ_{dfc} maior que 96 % do γ_d para o W_{ot} ;

Quando um cilindro compactador não é capaz de compactar uma camada superior a 20 cm, não é considerado o valor correspondente. No caso de cilindros de pés de carneiro é considerado que a sua utilização não é eficaz para solos não coesivos, sendo suprimida a situação no quadro correspondente ao equipamento.

Os parâmetros que definem a modalidade de compactação são:

- Q/S;
- Espessura da camada compactada;
- Velocidade de translação do cilindro.

O parâmetro Q/S é obtido dividindo Q , que é o volume de solo compactado durante um dado período de tempo e S , a superfície percorrida pelo compactador durante o mesmo tempo. Este parâmetro representa o ritmo de utilização de um compactador e é expresso em m^3/m^2 .

O valor Q/S representa a espessura do solo compactado por cada passagem do cilindro, ou seja a espessura unitária de compactação.

Por exemplo, um cilindro vibrador tipo V2 na compactação de um solo A2 (areia fina siltosa), com compactação média, apresenta um valor de $Q/S = 0,035$. Este valor representa que por cada passagem deste cilindro a espessura compactada será de 3,5 cm. Se pretendermos compactar uma camada do solo referido com 17,5 cm de espessura e energia média, terá de efetuar 5 passagens do equipamento.

Pela classificação de compactadores LCPC/SETRA, os cilindros compactadores dividem-se em:

- Cilindros de pneus: P_i ;
- Cilindros vibradores de rolo liso: V_i ;
- Cilindros vibradores de pés de carneiro: V_{P_i} ;
- Cilindros estáticos de pés de carneiro: S_{P_i} ;
- Placas Vibradoras: P_{Q_i} .

Em que i é o número da classe e cresce com a eficácia do compactador no seio de cada família.

As características dos compactadores estáticos de pés de carneiros, designados como *Tamping Roller* de alta velocidade, permitem velocidades significativas, na ordem dos 12 km/h. No entanto o LCPC recomenda que as primeiras passagens sejam executadas com velocidades mais baixas, na ordem dos 3 km/h.

As placas vibradoras não são aplicáveis em aterros de estradas, já que a sua produção é muito baixa. São adequadas para utilização em aterros muito reduzidos, em zonas pontuais, como na compactação de solo sobre valas de pequena largura.

O Quadro 20 resume a relação Solo – Compactador da LCPC/SETRA.

Quadro 20 – Quadro resumo das classificações LCPC/SETRA para os equipamentos de compactação (adaptado de LCPC/SETRA, 1992).

CILINDROS DE PNEUS		
Classificação LCPC/SETRA	Carga por roda (kN)	
P1	≥ 25 a < 40	
P2	≥ 40 a < 60	
P3	≥ 60	
CILINDROS VIBRADORES DE ROLO LISO E CILINDROS VIBRADORES DE PÉS DE CARNEIRO		
Classificação LCPC/SETRA	(M1 / L) (A0) ^{1/2}	A0 (mm)
V1	≥ 15 a < 25	≥ 0,6
	≥ 25	≥ 0,6 a < 0,8
V2	≥ 25 a < 40	≥ 0,8
	≥ 40	≥ 0,8 a < 1
V3	≥ 40 a < 55	≥ 1
	≥ 55	≥ 1 a < 1,3
V4	≥ 55 a < 70	≥ 1,3
	≥ 70	≥ 1,3 a < 1,6
V5	≥ 70	≥ 1,6
M1 – massa total aplicável sobre a geratriz dum cilindro vibrador ou estático (kg); L – comprimento da geratriz dum cilindro vibrador ou estático (cm); A0 – amplitude teórica a vazio, calculada pela relação momento da excentricidade no veio de balanceamento (me) com a massa da parte vibrante solicitada pelo veio de balanceamento (M0).		
$A0 = 1000 \times \frac{me}{M0}$		(mm) Equação 16
CILINDRO ESTÁTICO DE PÉS DE CARNEIRO		
Classificação LCPC/SETRA	(M1 / L) (kg/cm)	
SP1	≥ 30 a < 60	
SP2	≥ 60 a < 90	
PLACAS VIBRATÓRIAS		
Classificação LCPC/SETRA	(M1 / L) (kg/cm)	
SP1	≥ 30 a < 60	
SP2	≥ 60 a < 90	

O Caderno de Encargos da EP define que o W dos solos antes de se iniciarem as operações de compactação deve ser tão próximo quanto possível do W_{ot} do ensaio de compactação utilizado como referência, não podendo diferir dele mais de 20% do seu valor. Se necessário deve ser feita a retificação do W_{ot} .

No caso de solos coerentes ($EA < 30 \%$), a compactação relativa de solos nos aterros, referida ao ensaio de compactação pesada, deve ser, neste caso de pelo menos 90% no corpo do aterro e 95% na PSA.

Quando os solos coerentes se apresentarem muito húmidos ($W > 1,4 W_{ot}$), reagindo à passagem do tráfego da obra com o designado “efeito de colchão”, os valores da compactação relativa acima referidos devem ser reportados ao ensaio Proctor Normal, quer se trate de solos no seu estado natural ou tratados com cal, exigindo-se para a sua obtenção uma redução da energia de compactação. Neste tipo de materiais devem ser utilizados de preferência cilindros pés-de-carneiro.

Para o leito do pavimento a compactação relativa, referida ao ensaio Proctor Modificado, não deve ser inferior a 95% em toda a área e espessura da camada, e o W não poderá diferir mais de 15% do W_{ot} obtido no ensaio de referência.

No fim de cada dia de trabalho não devem ficar materiais por compactar, mesmo no caso em que uma camada tenha sido escarificada para perda de humidade e não se tenha alcançado o objetivo pretendido. Nestes casos a camada deve ser compactada e reescarificada no dia seguinte, se as condições climatéricas o permitirem.

5. Controlo da qualidade dos aterros. Ensaio para o controlo da compactação

5. Controlo da qualidade dos aterros. Ensaios para o controlo da compactação

5.1. Introdução

Neste capítulo são abordados os ensaios de controlo a efetuar nos materiais aterrados e os principais métodos para o controlo da compactação.

A qualidade dos trabalhos desenvolvidos numa obra, assim como as características dos materiais e equipamentos utilizados, são pontos fundamentais para um bom desempenho de qualquer infraestrutura durante a sua vida útil. Para isso, deve ser realizado um controlo contínuo das operações de construção (Correia & Brandl, 2001).

Numa obra em que seja necessário a execução de terraplenagens, devem ser realizados os seguintes ensaios, laboratoriais e *in situ*, de controlo para o aterro e para o leito do pavimento.

Nos Quadros 21, 22 e 23 são apresentados os ensaios que se devem efetuar nestas estruturas, assim como o número de ensaios e a sua periodicidade, segundo o Caderno de Encargos da EP:

Quadro 21 – Ensaios a realizar em aterros de solos e a sua frequência (adaptado de EP, 2009).

ATERROS - SOLOS	Ensaio	Norma	N.º de ensaios e frequência de execução	
	Granulometria	LNEC E 196	1	Por escavação e/ou em cada 25000 m ³ escavados, ou sempre que haja alteração da natureza dos solos. (a)
W _L e W _p	NP 143	1	(a)	
MO	LNEC E 201	1	(a)	
EA	LNEC E 199	1	(a)	
Proctor Modificado	LNEC E 197	1	(a)	
W	NP 84	3	Por perfil em cada camada. (b)	
Baridade <i>in situ</i> - GA	LNEC E 204	3	(b)	

Quadro 22 – Ensaios a realizar em solos para o leito do pavimento e a sua frequência (adaptado de EP, 2009).

LEITO DO PAVIMENTOS - SOLOS	Ensaio	Norma	N.º de ensaios e frequência de execução	
	Granulometria	LNEC E 196	1	Por cada 6000 m ² ou por dia de trabalho.
	W _L	NP 143	1	Por cada 6000 m ² ou por dia de trabalho.
	W _P		1	Por cada 6000 m ² ou por dia de trabalho.
	TMO	LNEC E 201	1	Por cada 6000 m ² ou por dia de trabalho.
	EA	LNEC E 199	1	Por cada 6000 m ² ou por dia de trabalho.
	MB	NF P 94-068	1	Por cada 6000 m ² ou por dia de trabalho.
	Proctor Modificado	LNEC E 197	1	Por cada 15000 m ² .
	CBR	LNEC E 198	1	Por cada 15000 m ² .
	W	NP 84	3	Em cada 12,5 m.
	GA	LNEC E 204	3	Em cada 12,5 m.
	ECP	LCPC	1	Em cada 2 km.

Quadro 23 - Ensaios a realizar em materiais granulares para o leito do pavimento e a sua frequência (adaptado de EP, 2009).

LEITO DO PAVIMENTO - MATERIAIS GRANULARES	Ensaio	Norma	N.º de ensaios e frequência de execução	
	Granulometria	NP EN 933-1	1	Por lote. (*)
	IA – Índice de achatamento	NP EN 933-3	1	Por lote. (*)
	C	NP EN 933-5	1	Por cada 20000 m ² . (*) (**)
	EA	NP EN 933-8	1	Por lote. (*)
	MB	NP EN 933-9	1	Por lote. (*)
	LA	NP EN 1097-2	1	Por cada 30000 m ² . (*)
	MDE	NP EN 1097-1	1	Por cada 30000 m ² . (*)
	γ _{ssd} , WA ₂₄ – Det. da massa volúmica e absorção água	NP EN 1097-6	1	Por cada 20000 m ² . (*)
	Proctor	EN 13286-2	1	Por cada 20000 m ² . (*)
	W e γ _d	ASTM D – 6938	3	Em cada 12,5 m.
	Régua (3 m)	---	1	De 25 em 25 m (longitudinal e transversal).
<p>Lote: a dimensão do lote a considerar deve ser a menor extensão que resulte da aplicação dos critérios: 500 m de extensão de faixa, 3500 m² de faixa; a extensão construída num dia.</p> <p>(*) – A executar durante a aplicação em obra, sendo que durante a execução do armazenamento serão realizados ensaios por cada 10000 m³.</p> <p>(**) – A executar por lote no caso de o agregado ser seixo britado.</p>				

O controlo da compactação deve ser realizado desde o início dos trabalhos de compactação. Tem como objetivos comprovar a qualidade do material aplicado e os resultados atingidos com a compactação. Isto através da determinação *in situ* do γ_d e do W (Correia & Brandl, 2001).

Pode ser dividido em duas fases:

- Durante a realização dos trabalhos de compactação: ocorre a verificação da qualidade do material de aterro, das características dos equipamentos utilizados que influenciam a compactação e da maior ou menor presença de água no terreno;
- Após a compactação do solo: os resultados obtidos com a compactação do material são geralmente avaliados com base nos valores da compactação relativa (GC) e nos desvios dos teores em água *in situ* relativamente ao W_{ot} desse material (Correia, 1980).

Apesar da compactação conferir ao aterro determinadas características mecânicas (resistência e deformabilidade), como já foi referido, apenas se medem os parâmetros γ_d e do W . Estes dois parâmetros são suficientes, uma vez que se o aterro foi realizado com o mesmo solo usado em laboratório na preparação das amostras e se além disso as características físicas forem semelhantes nestas amostras e no aterro, é legítimo esperar que o comportamento mecânico seja também similar (Fernandes, 2004).

Os ensaios para o controlo da compactação são realizados após um determinado número de passagens do equipamento compactador, fixado pelo projetista ou pela fiscalização, após a realização de um trecho experimental. Pode ainda existir para um determinado equipamento e para um dado tipo de solo, um número de passagens a partir do qual pouco se ganha em termos de compactação. As medições devem ser feitas logo após o final da compactação, assim como devem ser ensaiadas zonas com pontos fracos visíveis. São removidas as partículas de maiores dimensões e possíveis zonas de material orgânico. Ao longo da evolução da construção, caso os ensaios iniciais sejam satisfatórios, é possível aumentar a distância entre pontos de ensaio (Army, 1997). Quanto à periodicidade dos ensaios, esta depende muito da heterogeneidade do solo e deve ser definida no Caderno de Encargos da obra ou pela fiscalização (Correia, 1980).

Seguidamente são descritos os métodos mais comuns para a avaliação do controlo da qualidade de aterros.

Métodos para a determinação da baridade seca *in situ*:

- Métodos radioativos;
- Método da garrafa de areia;
- Método do volume de água deslocado;
- Método do balão ou do densitómetro de membrana;
- Método do extrator ou do anel volumétrico.

Métodos para a determinação do teor em água *in situ*:

- Métodos radioativos;
- Método do *Speedy*;
- Método do álcool.

5.2. Método radioativo

Este método é descrito na norma ASTM D – 6938 (2010). Pode ser aplicado em solos, agregados ou mistura dos dois e pavimentos betuminosos. Utiliza-se quer para a obtenção do γ_d , quer do W .

Este é um método não destrutivo e atualmente é o mais utilizado para ensaios de controlo de compactação, devido à sua extrema rapidez de execução e comodidade.

Consiste num equipamento portátil, denominado gamadensímetro, cujo nome comercial é *Troxler* (Figura 26). O equipamento é constituído por uma fonte radioativa e por um recetor-contador.



Figura 26 – Equipamento Troxler a efetuar controlo da compactação em obra.

São emitidos raios gama para a camada a ensaiar, com determinada energia, procedendo-se à contagem daqueles que chegam ao recetor sem perda de energia. A contagem será tanto maior, quanto mais densa estiver a camada.

Para a determinação da γ_d são emitidos raios gama e para a determinação do W são emitidos neutrões. Comparando estes valores com os valores obtidos nos ensaios laboratoriais, para uma dada energia de compactação, é possível determinar o GC.

Existem dois métodos para aplicação das fontes radioativas:

- Método A – Transmissão direta: é realizado um furo na camada a avaliar até à profundidade desejada, onde se introduz a vara (fonte). A intensidade dos raios gama é captada por unidade de tempo no contador Geiger-Muller e é inversamente proporcional à densidade do material atravessado;
- Método B – Transmissão indireta: o equipamento é colocado sobre a camada a ensaiar. As fontes de raios gama e neutrões e os detetores estão no mesmo plano. Os raios gama penetram na camada e os que chegam aos detetores sem perda de energia são contados. A intensidade da resposta detetada no recetor é proporcional ao W do material.

Na Figura 27 estão representados os diferentes métodos de determinação do γ_d e do W. O teor em água apenas é medido através do método de transmissão indireta de neutrões.

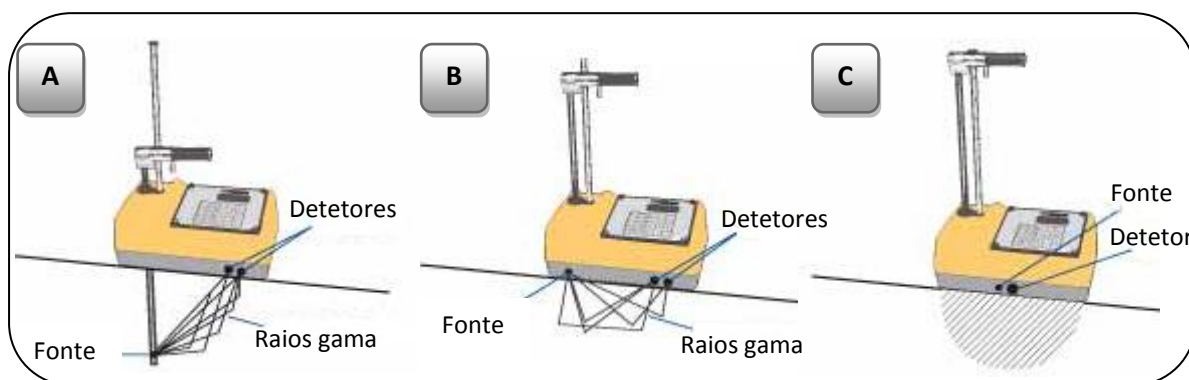


Figura 27 – Gamadensímetros: A – Transmissão direta; B – Transmissão indireta; C – Determinação do teor em água. (<http://www.troxlerlabs.com>).

As medições dos parâmetros a determinar *in situ* podem ser afetadas por alguns fatores.

Principais fatores que afetam a medição da baridade:

- Composição química do material a testar;
- Solos não homogêneos e superfícies com textura por má preparação desta;

- As medições efetuadas por transmissão indireta são mais influenciáveis pelo γ_d e W do material mais próximo da superfície;
- Partículas de grandes dimensões ou vazios no percurso dos raios gama podem provocar alterações nas medições;
- Presença de outras fontes radioativas no local. Outras eventuais fontes radioativas devem estar afastadas no mínimo 9 m do local de ensaio.

Principais fatores que afetam a medição do teor em água:

- Composição química do material a testar;
- A medição do W é influenciada pelo W do material mais próximo da superfície;
- Outras fontes de neutrões presentes no local devem estar afastadas no mínimo 9 m do local de ensaio.

Devido à presença de materiais radioativos devem ser tomadas especiais precauções, quer no seu manuseamento, quer no seu transporte. Este equipamento requer calibrações periódicas.

Existe outro tipo de equipamento não nuclear (*PaveTracker*), que permite a medição da baridade *in situ* de camadas de misturas betuminosas. Estes utilizam um dispositivo que mede indicadores da densidade eletromagnética.

Em relação ao gamadensímetro, apresenta a vantagem de não utilizar fontes radioativas, o que elimina muitas das precauções necessárias à sua correta utilização. A técnica de ensaio está descrita na norma ASTM D – 7113 / D – 7113M (2010).

5.3. Outros métodos de ensaios para o controlo da compactação

No Quadro 24 são apresentados outros ensaios de campo para a determinação do γ_d e do W .

Quadro 24 – Métodos de ensaio realizados *in situ* para a medição da baridade seca e do teor em água.

ENSAIOS PARA DETERMINAR A BARIDADE SECA <i>IN SITU</i>	
Normalmente, estes ensaios realizam-se em intervalos regulares e a sua frequência deve ser de 1 a 5 ensaios por 1000 m ³ ou por 1000 m (Correia, 1980).	
Método de ensaio	Descrição do método
Método da garrafa de areia LNEC E 204 (1967)	O ensaio consiste na realização de um furo na camada a ensaiar. É pesado o solo retirado do furo e determinado o seu teor em água. Enche-se o furo com areia de baridade conhecida, pesando a garrafa com o remanescente de areia. Pela relação entre o peso do solo removido e o seu teor em água é determinada a baridade seca do solo. Este é um método destrutivo.

Quadro 24. 1 - Métodos de ensaio realizados *in situ* para a medição da baridade seca e do teor em água (continuação).

ENSAIOS PARA DETERMINAR A BARIDADE SECA <i>IN SITU</i>	
Método de ensaio	Descrição do método
Método do volume de água deslocado LNEC E 205 (1967)	Este método apenas é aplicado a solos com coesão, de modo a formar torrões com dimensões suficientes. Este é um método destrutivo. Permite a obtenção do valor da baridade seca a partir da determinação da massa e do volume numa amostra intacta de solo envolvida em parafina da camada a ensaiar.
Método do balão ou do densitómetro de membrana ASTM D – 2167 (2008)	A aplicação deste método é semelhante ao da garrafa de areia, com a exceção do balão utilizado para determinar o volume do furo. Não deve ser utilizado em solos pouco consistente, pois há o risco da pressão do balão ou da membrana poder alterar o volume do furo. Também não deve ser aplicado em solos que contenham fragmentos de rocha que possam furar o balão ou a membrana. Este é um método destrutivo.
Método do extrator ou do anel volumétrico	Este é um ensaio apenas utilizado em solos finos. Este método consiste na cravação no terreno de um anel com dimensões normalizadas, seguidamente retira-se o solo em volta deste e extrai-se o cilindro com a amostra. A partir da pesagem e da determinação do teor em água determina-se a baridade seca.
ENSAIOS PARA DETERMINAR O TEOR EM ÁGUA <i>IN SITU</i>	
Normalmente, estes ensaios realizam-se em intervalos regulares e a sua frequência deve ser de 1 a 5 ensaios por 1000 m ³ ou de 5 a 10 ensaios por 1000 m (Correia, 1980).	
Método de ensaio	Descrição do método
Método do <i>Speedy</i> AASHTO T217 (1967)	Este método apenas é aplicável em solos granulares e agregados finos. Não deve ser usado em solos muito finos, devido à dificuldade em separar as partículas, pois pode causar menor precisão no ensaio. Consiste em fazer reagir o solo com carboneto de cálcio no interior de uma garrafa <i>Speedy</i> , em que vai ocorrer libertação de gás acetileno, aumentando a pressão no interior da garrafa. O volume de gás libertado, determinado por um manómetro, é diretamente proporcional ao volume de água da amostra ensaiada. Para cada ensaio realizado é necessário proceder à calibração, comparando os teores em água obtidos através do <i>Speedy</i> com os teores em água obtidos por secagem em estufa. Esta é considerada uma desvantagem deste método.

Quadro 24. 2 - Métodos de ensaio realizados *in situ* para a medição da baridade seca e do teor em água (continuação).

ENSAIOS PARA DETERMINAR O TEOR EM ÁGUA <i>IN SITU</i>	
Método de ensaio	Descrição do método
Método do álcool	<p>Este método destina-se a solos que não contenham matéria orgânica nem gesso. Consiste em embeber o solo em álcool e proceder à sua combustão. O solo deve estar devidamente destorroado, de modo a que o álcool entre em contato com todas as partículas da amostra. O ensaio é repetido até que a massa do solo seja constante.</p> <p>O teor em água é a diferença entre o peso inicial da amostra e o peso após a sua combustão.</p>

5.4. Considerações sobre o estado da compactação

Após a realização dos ensaios do controlo da qualidade da compactação, esta pode revelar-se insuficiente. Isto é, o GC pode não ser compatível com os requisitos do CE da obra.

Algumas situações que podem contribuir para este fenómeno são (Army, 1997):

- Número insuficiente de passagens do cilindro;
- Peso insuficiente do cilindro;
- No caso de serem utilizados cilindros vibradores, a utilização de uma frequência inadequada;
- Defeitos no rolo do cilindro;
- Tipo de equipamento não adequado;
- Alteração no tipo de solo;
- Solo demasiado húmido ou demasiado seco.

Todos estes problemas poderão ser evitados com uma boa análise prévia à compactação. Se por algum motivo não forem obtidos os resultados pretendidos, deve-se analisar os fatores descritos.

6. Estudio experimental

6. Estudo experimental

6.1. Introdução

Este estudo tem como objetivo a análise dos resultados obtidos na medição dos parâmetros do controlo da compactação. Assim, é apresentada uma descrição do local e dos trabalhos realizados na obra. Por fim são expostos os resultados dos ensaios laboratoriais e de campo.

6.2. Enquadramento do local

6.2.1. Localização geográfica

A área em estudo situa-se na região Centro (Beira Baixa), no distrito de Castelo Branco, concelho de Castelo Branco, freguesia de Castelo Branco (Figura 28).



Figura 28 – Localização geográfica da área em estudo: A – Mapa da região (adaptado de http://netin.es.ipcb.pt/cp_patrimonio/index.htm) ; B – Local da obra (www.viamichelin.pt).

6.3. Enquadramento da obra

A obra consiste na construção da ETAR de Castelo Branco (Figura 29) em que o cliente é a empresa Águas de Portugal e cuja linha processual de tratamento integra tratamento preliminar (gradagem, desarenação e desengorduramento) e tratamento terciário (remoção de azoto e fósforo).

No tratamento de fase sólida está incluído o espessamento, a digestão anaeróbia de lamas com valorização energética do biogás por co-geração, bem como a desidratação e higienização das lamas. Está também incluído o tratamento dos odores produzidos na instalação.

A empreitada inclui ainda o emissário de descarga do afluente tratado no meio recetor, a via de acesso à ETAR bem como todas as obras incluídas na empreitada. Esta estrutura ocupa uma área de 14200 m² (Mota-Engil & Águas do Centro, 2012).



Figura 29 – ETAR de Castelo Branco (Mota-Engil & Águas do Centro, 2012).

6.4. Descrição dos trabalhos

Nesta obra ocorreram trabalhos de movimentos de terras (75000 m³) e escavação em rocha (10878 m³) para a execução de terraplenagens das plataformas da ETAR (Figura 30) e vias de acesso (Figura 31).



Figura 30 – Execução do aterro para um dos tanques de arejamento.



Figura 31 – Compactação da camada de agregado da via de acesso à ETAR.

6.5. Metodologia de ensaios

Nesta obra foram utilizados três solos e um AGE. Devido à localização dos ensaios *in situ* realizados na ETAR, este estudo apenas considerado os resultados obtidos num solo e num AGE. No Quadro 25 são apresentados os ensaios realizados a cada material estudado.

Quadro 25 – Ensaio realizados para a caracterização do material.

Parâmetros ensaiados	Solo	AGE
Granulometria	✓	✓
Limites de consistência	✓	
Compactação	✓	✓
Teor em água	✓	
Peso específico e absorção de água		✓

No Quadro 26 estão apresentados os resultados dos ensaios ao solo e as normas que foram utilizadas e no Quadro 27 os valores esperados para o peso volúmico seco de vários materiais.

Quadro 26 - Valores obtidos nos ensaios laboratoriais realizados ao solo.

Análise granulométrica por peneiração húmida LNEC E 239: 1970	Abertura dos peneiros	Malha dos peneiros (mm)	% de passados acumulados		
	1"	25	100,0		
	3/4"	19	98,6		
	3/8"	9,5	95,5		
	n.º 4	4,76	77,2		
	n.º 10	2	48,0		
	n.º 20	0,85	29,3		
	n.º 40	0,425	20,6		
	n.º 60	0,250	15,2		
	n.º 140	0,106	9,4		
n.º 200	0,075	7,9			
Determinação dos limites de consistência - NP 143: 1969			LL = NP	LP = NP	IP = NP
Compactação PROCTOR - LNEC E 197: 1966			$\gamma_{d \text{ máx}} = 2,058 \text{ g/cm}^3$	$W_{op} = 8,2\%$	
Teor em água - NP 84: 1965			$W = 6,0\%$		
Classificação do solo			Unificada		AASHTO
			SW-SM		A-1-a (0)

Quadro 27 – Valores esperados para o peso volúmico seco de vários materiais (Fernandes, 2004).

	Peso volúmico seco (kg/m^3)	
	Mínimo	Máximo
Areia uniforme	1326	1887
Silte uniforme e inorgânico	1285	1887
Areia siltosa	1397	2039
Areia (mistura de fina e grossa)	1366	2213
Areia com mica	1214	1927
Areia, silte e seixo misturados	1428	2335

Nas Figuras 32 e 33 estão apresentados os resultados gráficos dos ensaios ao solo.

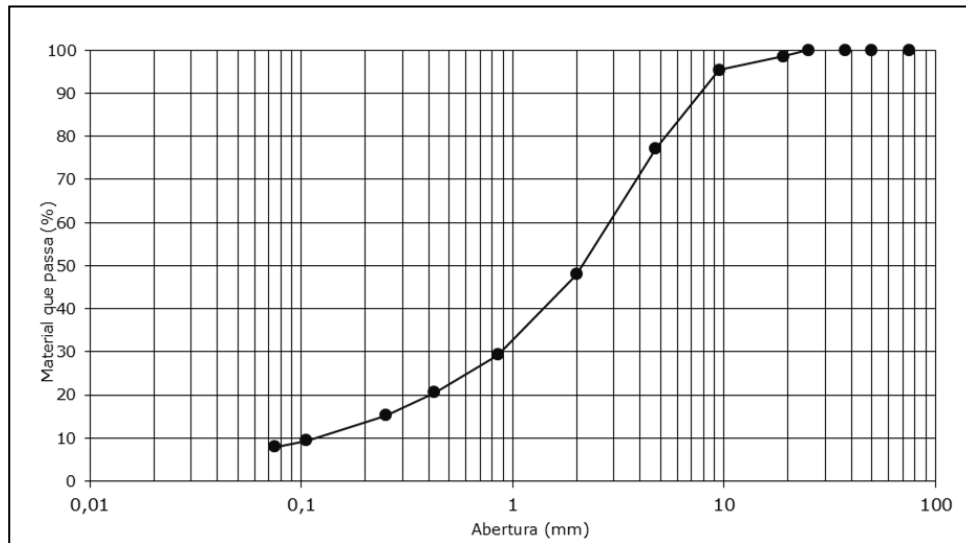


Figura 32 - Curva granulométrica do solo ensaiado.

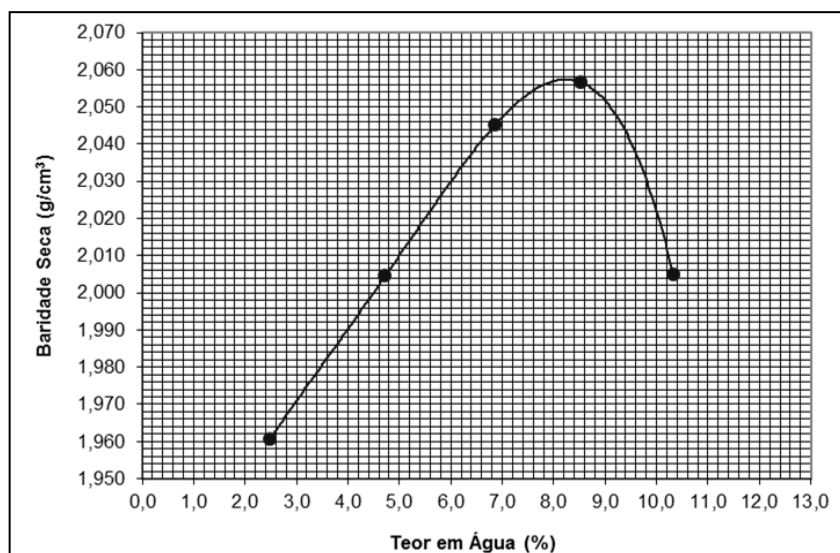


Figura 33 - Curva de compactação Proctor do solo.

Através dos resultados da análise granulométrica e dos limites de consistência, é possível definir este solo como:

- SW-SM pela Classificação Unificada, ou seja, é uma areia bem graduada com silte. Este material quando compactado apresenta permeabilidade; quando compactado e saturado apresenta uma excelente a boa resistência ao corte e baixa a desprezável compressibilidade. Quanto à trabalhabilidade como material de construção pode classificar-se de bom;

- A-1-a (0) pela Classificação da AASHTO, isto é, um solo grosso constituído por cascalho e areia, este material apresenta um comportamento sob o pavimento excelente a bom.

No Quadro 28 e na Figura 34 estão apresentados os resultados dos ensaios ao AGE e as respetivas normas que foram utilizadas.

Quadro 28 – Resultados laboratoriais para a caracterização do AGE.

Análise granulométrica com lavagem JAE. S.8: 1953	Abertura dos peneiros	Malha dos peneiros (mm)	% de passados acumulados	Abertura dos peneiros	Malha dos peneiros (mm)	% de passados acumulados	
	2"	50	100,0	n.º 4	4,75	38,2	
	1 1/2"	37,5	99,4	n.º 8	2,36	31,4	
	1"	25	82,9	n.º 10	2	30,0	
	3/4"	19	68,6	n.º 20	0,85	22,0	
	5/8"	16	62,7	n.º 40	0,425	16,4	
	1/2"	12,5	55,7	n.º 80	0,18	10,3	
	3/8"	9,5	49,8	n.º 200	0,075	6,8	
1/4"	6,3	42,2					
Peso específico e absorção de água de inertes JAE P.6-53	Peso específico (g/cm ³)				R#3/4"	R#3/8"	P#3/8"
		Partículas Secas			2,60	2,59	2,55
		Material Impermeável das Partículas			2,65	2,65	2,57
		Partículas Saturadas com a Superfície Seca			2,62	2,61	2,56
Absorção (%)				0,75	0,92	0,32	
Compactação de Agregados LNEC E 197: 1966	$\gamma_d \text{ corrigido} = 2,223 \text{ g/cm}^3$			$W_{\text{corrigido}} = 5,0 \%$			

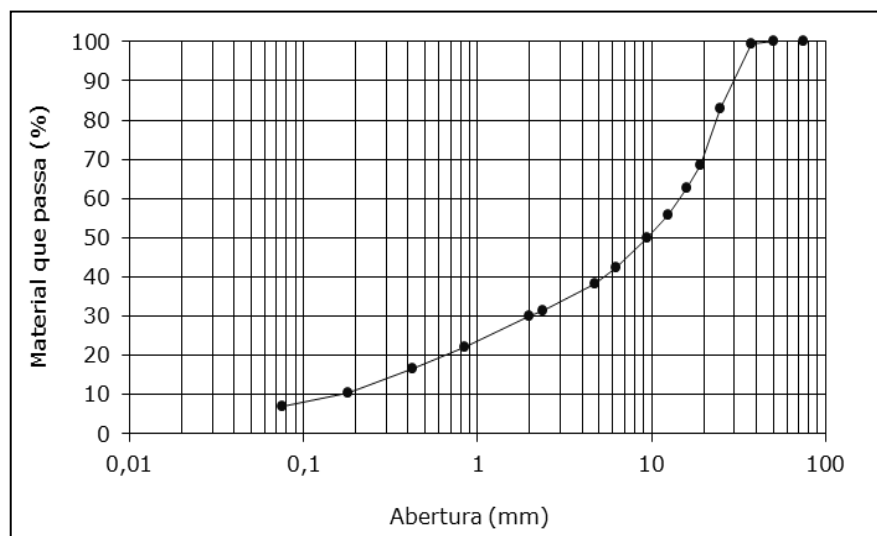


Figura 34 – Curva granulométrica do AGE.

Na campanha de ensaios *in situ* foi realizado o controlo da compactação com recurso ao gamadensímetro pelo método indireto:

- Das camadas do solo que rodeia os tanques de arejamento (Figura 35);
- Das camadas do agregado:
 - Da via de acesso à ETAR;
 - Da base do pavimento no interior da ETAR.

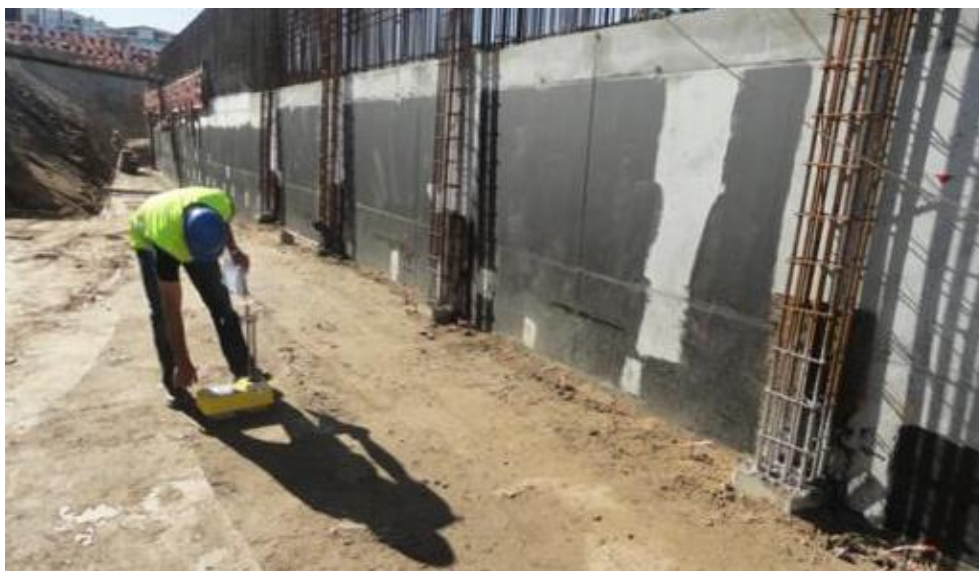


Figura 35 – Controlo de compactação na camada de solo junto ao tanque de arejamento.

No Quadro 29 está descrita a campanha de ensaios realizada. A malha das determinações de cada em ensaio é aleatória, sendo definida pelo fiscal da obra no momento da realização do controlo.

Quadro 29 – Número de ensaios realizados *in situ*.

N.º de ensaios realizados em cada material	
Material	N.º de ensaios
Solo – 18 conjuntos de ensaios	257
AGE - Via de acesso - 2 camadas	49
AGE - Base do pavimento – 2 camadas	119

6.6. Ensaio *in situ*

6.6.1. Resultados do gamadensímetro

De seguida são apresentados os resultados obtidos no controlo da compactação com o gamadensímetro, para o solo e para o AGE de origem granítica.

A partir dos valores obtidos foi possível traçar os gráficos que representam o desenvolvimento das medições em função das camadas e comparação com os valores médios e resultados laboratoriais. Também foram calculados o desvio padrão e o coeficiente de variação para cada parâmetro, em cada camada. A partir do cálculo do desvio padrão, é possível verificar a variabilidade dos resultados em relação à média. Isto é, quanto menor o valor do desvio padrão, menor é a sua variabilidade. Em relação ao valor do coeficiente de variação, quanto menor o seu valor, menor a variabilidade dos valores medidos.

Foram ainda realizados histogramas para cada um dos parâmetros medidos. Estes refletem a frequência com que determinado intervalo de valores se repete ao longo das medições, considerando o valor máximo, o valor mínimo e a respetiva amplitude. Assim, cada parâmetro foi dividido em classes, de modo a se poder avaliar a distribuição dos seus valores.

Solo A1162:

A Figura 36 representa um esquema simplificado da ordem das camadas de solo aplicadas na obra, assim como as respetivas cotas e na Figura 37 o n.º de ensaios em cada camada.

Cotas (m) ↑		↑ Cotas (m)
322,20	Camada 15	
330,80	Camada 14	
321,40	Camada 13	330,40
321,00	Camada 12	330,00
320,60	Camada 11	
320,20	Camada 10	
319,70	Camada 9	
319,30	Camada 8	
318,90	Camada 7	
318,60	Camada 6	
318,20	Camada 5	
317,80	Camada 4	
317,40	Camada 3	
317,00	Camada 2	325,10
316,60	Camada 1	

Figura 36 – Esquema representativo das camadas de solo aplicadas na obra.

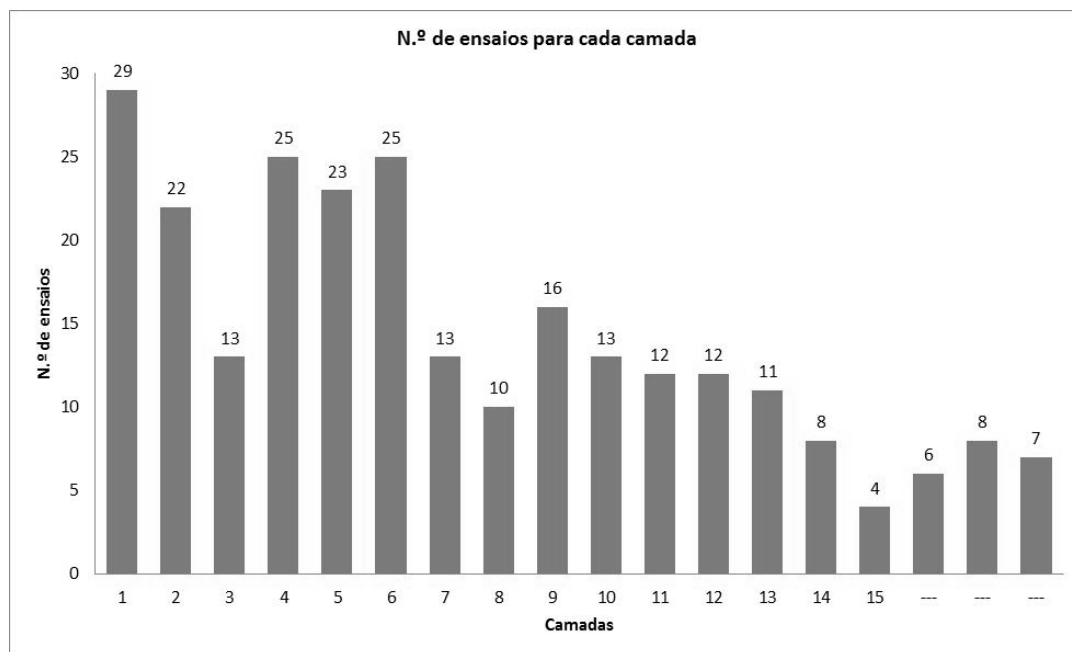


Figura 37 – Representação gráfica do número de ensaios realizados em cada camada.

Verifica-se que as camadas de 1 a 9 foram objeto de maior número de ensaios. À medida que a construção da obra avança, o número de ensaios pode ser reduzido caso os valores medidos anteriormente sejam satisfatórios.

O Quadro 30 mostra os resultados dos ensaios realizados em cada camada, considerando os parâmetros baridade húmida (WD), teor em água (W), baridade seca (DD) e grau de compactação (GC).

Quadro 30 – Resultados obtidos nos ensaios *in situ* para cada camada de solo.

Camada / Cotas (m)	WD (kg/m ³)	W (%)	DD (kg/m ³)	GC (%)	Camada / Cotas (m)	WD (kg/m ³)	W (%)	DD (kg/m ³)	GC (%)	
1 / 316,6 e 325,1	2082	5,3	1977	96,1	1 / 316,6 e 325,1	2028	4,2	1946	94,6	
	2133	5,1	2029	98,6		2055	3,4	1987	96,6	
	1979	6,7	1855	90,1		2108	2,7	2053	99,7	
	2018	5,8	1907	92,7		2013	2,8	1958	95,1	
	2112	6,8	1978	96,1		2084	4,3	1998	97,1	
	2154	5,5	2042	99,2		2147	4,7	2051	99,6	
	2035	6,2	1916	93,1		2097	4,3	2011	97,7	
	1987	7,0	1857	90,2		2117	7,2	1975	96,0	
	2049	5,7	1939	94,2		2162	5,3	2053	99,8	
	2073	5,9	1958	95,1		2104	5,8	1989	96,6	
	2040	4,0	1962	95,3		2128	5,7	2013	97,8	
	2088	3,5	2017	98,0		2146	5,8	2028	98,6	
	2104	3,9	2025	98,4		2101	4,9	2003	97,3	
	2042	4,7	1950	94,8		2 / 317,0	2027	4,8	1934	94,0
	2091	3,6	2018	98,1			2077	5,9	1961	95,3
2059	3,2	1995	96,9	2119	5,6		2007	97,5		

Quadro 30. 1- Resultados obtidos nos ensaios *in situ* para cada camada de solo (continuação).

Camada / Cotas (m)	WD (kg/m ³)	W (%)	DD (kg/m ³)	GC (%)	Camada / Cotas (m)	WD (kg/m ³)	W (%)	DD (kg/m ³)	GC (%)
2 / 317,0	1980	5,3	1880	91,4	4 / 317,8	2020	5,2	1920	93,3
	2154	6,7	2019	98,1		2072	5,4	1966	95,5
	2150	6,6	2017	98,0		2066	3,9	1988	96,6
	2033	5,0	1936	94,1		2081	6,2	1960	95,2
	2126	6,4	1998	97,1		2093	3,6	2020	98,2
	2061	5,7	1950	94,7		2157	6,6	2023	98,3
	2126	6,4	1998	97,1		2104	8,6	1937	94,1
	2064	5,3	1960	95,2		2123	8,2	1962	95,3
	2107	5,7	1993	96,9		2095	8	1940	94,3
	2025	5,6	1918	93,2		2021	3,5	1953	94,9
	2015	4,7	1925	93,5		2132	4,4	2042	99,2
	2143	6,9	2005	97,4		2143	4,4	2052	99,7
	2081	5,3	1976	96,0		2040	4,3	1957	95,1
	2196	8,1	2031	98,7		2025	5,6	1918	93,2
	2122	9,7	1934	94,0		2015	4,7	1925	93,5
	2084	7,6	1937	94,1		2143	6,9	2005	97,4
	2117	6,8	1982	96,3		2081	5,3	1976	96,0
	2090	5,5	1981	96,3		2196	8,1	2031	98,7
	2140	4,6	2046	99,4		2122	9,7	1934	94,0
	2108	7,2	1966	95,5		2084	7,6	1937	94,1
	2104	5,1	2002	97,3		2117	6,8	1982	96,3
	2081	5,7	1969	95,7		2090	5,5	1981	96,3
	2063	5,8	1950	94,7		2140	4,6	2046	99,4
	2066	5,7	1955	95,0		2108	7,2	1966	95,5
2062	4,8	1968	95,6	2104	5,1	2002	97,3		
2106	5,7	1992	96,8	2135	5,3	2028	98,5		
2067	4,1	1985	96,5	2148	6,3	2021	98,2		
2091	3,7	2017	98,0	2185	6,3	2056	99,9		
2126	4,7	2030	98,6	2106	7,2	1965	95,5		
2071	3,5	2001	97,2	2096	5,9	1979	96,2		
2028	4,3	1945	94,5	2047	4,2	1964	95,4		
3 / 317,4	2026	4	1948	94,7	5 / 318,2	2091	4,9	1994	96,9
	2131	5,6	2018	98,1		2076	4,3	1992	96,8
	2064	5,9	1949	94,7		2088	7,3	1947	94,6
	2056	6,4	1932	93,9		2164	5,7	2047	99,5
	2015	5,7	1906	92,6		2163	8,0	2003	97,3
	2098	5,3	1992	96,8		2167	9,7	1975	96,0
	1978	3,9	1904	92,5		2164	7,6	2011	97,7
	2092	5,5	1983	96,4		2180	8,0	2019	98,1
	2111	5,6	1999	97,1		2159	8,0	1999	97,1
	2104	7,6	1955	95,0		2143	8,9	1968	95,6
	2110	4	2029	98,6		2145	10,5	1941	94,3
	2032	3,6	1961	95,3		2114	8,2	1954	94,9
2055	4,3	1970	95,7	2119	7,7	1968	95,6		
4 / 317,8	2198	7	2054	99,8	6 / 318,6	2183	6,0	2059	100,1
	2063	6,3	1941	94,3		2159	7,8	2003	97,3
	2192	7,2	2045	99,4		2163	6,2	2037	99,0
	2170	6	2047	99,5		2151	4,9	2051	99,6
	2125	6,7	1992	96,8		2094	5,9	1977	96,1

Quadro 30. 2- Resultados obtidos nos ensaios *in situ* para cada camada de solo (continuação).

Camada / Cotas (m)	WD (kg/m ³)	W (%)	DD (kg/m ³)	GC (%)	Camada / Cotas (m)	WD (kg/m ³)	W (%)	DD (kg/m ³)	GC (%)
6 / 318,6	2123	3,9	2044	99,3	9 / 319,7	2120	7,2	1979	96,2
	2133	5,2	2028	98,5		2100	7,6	1952	94,8
	2081	5,9	1966	95,5		2155	7,0	2013	97,8
	2035	4,7	1944	94,4		2137	8,1	1977	96,1
	2100	5,2	1997	97,0		2062	5,3	1957	95,1
	2176	6,6	2041	99,2		2135	6,0	2014	97,9
	2170	9,8	1976	96,0		2102	5,4	1995	96,9
	2196	6,7	2057	100,0		2129	4,2	2044	99,3
	2202	7,1	2056	99,9		2131	6,6	1999	97,1
	2240	8,8	2058	100,0		10 / 320,2	2166	8,6	1994
	2073	4,6	1982	96,3	2204		8,4	2032	98,7
	2096	5,1	1994	96,9	2173		7,5	2021,4	98,2
	2125	8,6	1957	95,1	2112		8,1	1953	94,9
	2049	4,8	1955	95,0	2136		8,4	1971	95,8
	2164	7,7	2009	97,6	2149		8,4	1982	96,3
	2107	7,9	1953	94,9	2108		7,7	1957	95,1
	2061	5,2	1959	95,2	2204		7,6	2049	99,6
	2078	6,7	1948	94,6	2203		7,5	2049,3	99,6
	2102	5,4	1994	96,9	2046		4,5	1957	95,1
	7 / 318,9	2167	6,3	2039	99,1	2039	3,2	1975	96,0
2129		5,6	2016	98,0	2080	5,2	1977	96,1	
2185		6,8	2046	99,4	2030	5,1	1931	93,9	
2123		5,7	2009	97,6	11 / 320,6	2233	10,0	2030	98,6
2100		6,1	1979	96,2		2175	10,4	1970	95,7
2112		6,8	1978	96,1		2195	8,6	2022	98,3
2088		5,5	1979	96,2		2221	8,6	2045	99,4
2166		6,7	2029	98,6		2137	8,2	1974	95,9
2123		9,2	1944	94,5		2106	7,9	1953	94,9
2103		4,5	2012	97,8		2169	7,1	2026	98,4
2125		5,3	2019	98,1		2113	8,3	1951	94,8
2084		5,2	1981	96,3		2123	8,5	1957	95,1
2108	4,3	2022	98,3	2188		6,7	2051	99,6	
8 / 319,3	2186	6,2	2058	100,0		2115	6,4	1988	96,6
	2119	5,1	2016	98,0		2150	7,9	1993	96,8
	2159	6,3	2031	98,7	12 / 321,0 e 330,0	2181	6,3	2052	99,7
	2180	9,5	1991	96,7		2012	6,6	1887	91,7
	2116	6,3	1990	96,7		2147	7,7	1994	96,9
	2136	6,4	2007	97,5		2063	4,4	1976	96,0
	2138	6,7	2003	97,3		2100	4,6	2008	97,6
	2138	5,6	2025	98,4		2097	5,9	1980	96,2
	2198	6,9	2055	99,9		2128	5,6	2015	97,9
	2105	6,7	1973	95,9		2144	8,5	1977	96,1
9 / 319,7	2143	8,9	1969	95,7		2167	9,8	1974	95,9
	2128	9,1	1951	94,8		2173	9,5	1985	96,5
	2107	8,9	1935	94,0	2156	8,8	1981	96,3	
	2145	7,8	1990	96,7	2100	5,9	1984	96,4	
	2128	9,9	1935	94,0	13 / 321,4 e 330,4	2140	5,1	2036	98,9
	2123	8,5	1956	95,0		2116	4,3	2029	98,6
	2162	7,5	2011	97,7		2191	7,9	2031	98,7

Quadro 30. 3- Resultados obtidos nos ensaios *in situ* para cada camada de solo (continuação).

Camada / Cotas (m)	WD (kg/m ³)	W (%)	DD (kg/m ³)	GC (%)	Camada / Cotas (m)	WD (kg/m ³)	W (%)	DD (kg/m ³)	GC (%)
13 / 321,4 e 330,4	2181	7,0	2038	99,0	--- / 389,2	1994	5,0	1899	92,3
	2158	6,3	2030	98,6		2058	4,0	1979	96,2
	2142	5,3	2034	98,8		2075	5,2	1972	95,8
	2084	6,5	1957	95,1		2058	6,1	1940	94,3
	2065	3,8	1989	96,7		2102	7,4	1957	95,1
	2018	3,9	1942	94,4		2168	6,3	2040	99,1
	2045	3,9	1968	95,6		2047	5,8	1935	94,0
	2026	4,6	1937	94,1		2081	6,5	1954	94,9
	2031	4,0	1953	94,9		2050	2,9	1992	96,8
	2039	4,5	1951	94,8	--- / 317,3	2037	3,6	1966	95,5
	2034	3,0	1975	96,0		2116	4,0	2035	98,9
	2012	3,5	1944	94,5		2055	2,5	2005	97,4
	2051	3,3	1985	96,5		2113	3,8	2036	98,9
	2055	3,9	1978	96,1		2033	5,1	1934	94,0
	2048	3,8	1973	95,9		2047	5,3	1944	94,5
	2043	3,5	1974	95,9					
	15 / 322,2	2123	6,1	2001	97,2				
		2148	7,5	1998	97,1				
2144		5,8	2026	98,5					
2140		8,7	1969	95,7					
--- / 321,9	2150	6,6	2017	98,0					
	2171	7,7	2016	97,9					
	2159	6,8	2022	98,2					
	2145	7,0	2005	97,4					
	2145	6,6	2012	97,8					
	2154	6,2	2028	98,6					

Os histogramas determinados para o solo A1162 dividem os valores obtidos em cada parâmetro em 17 classes.

Seguidamente, nas Figuras 38, 39, 40 e 41 são apresentados os gráficos que demonstram a frequência com que determinado intervalo de valores se repete ao longo das medições.

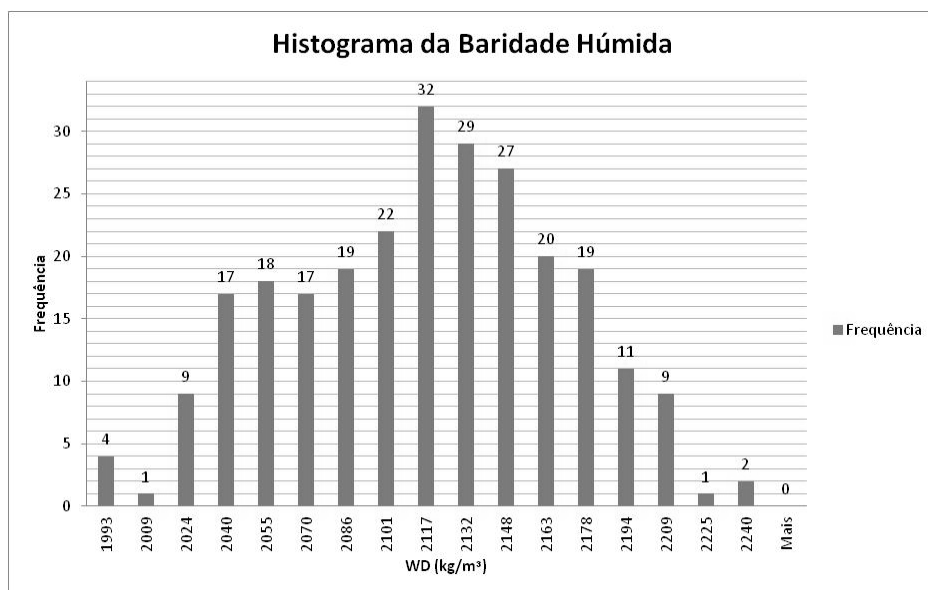


Figura 38 – Histograma para a baridade húmida.

No histograma apresentado na Figura 38 verifica-se que os valores com maior frequência estão entre 2101 e 2148 kg/m³. O valor médio (2108 kg/m³) encontra-se neste bloco.

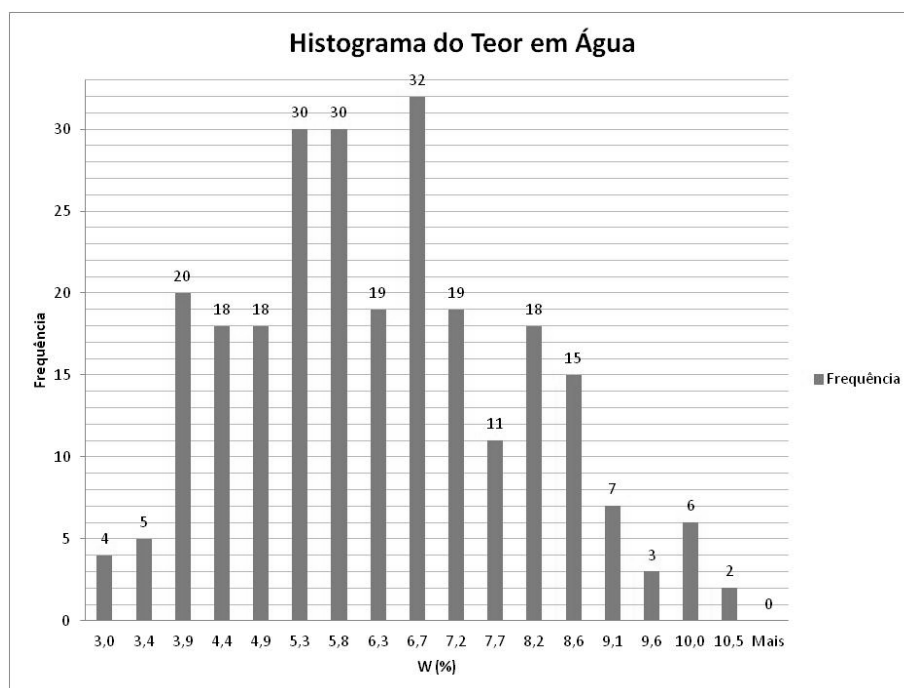


Figura 39 – Histograma para o teor em água.

No histograma apresentado na Figura 39 verifica-se que os valores com maior representatividade estão compreendidos entre 4,9 a 5,8% e 6,3 a 6,7%. O valor do W_{ot} está num bloco de menor frequência.

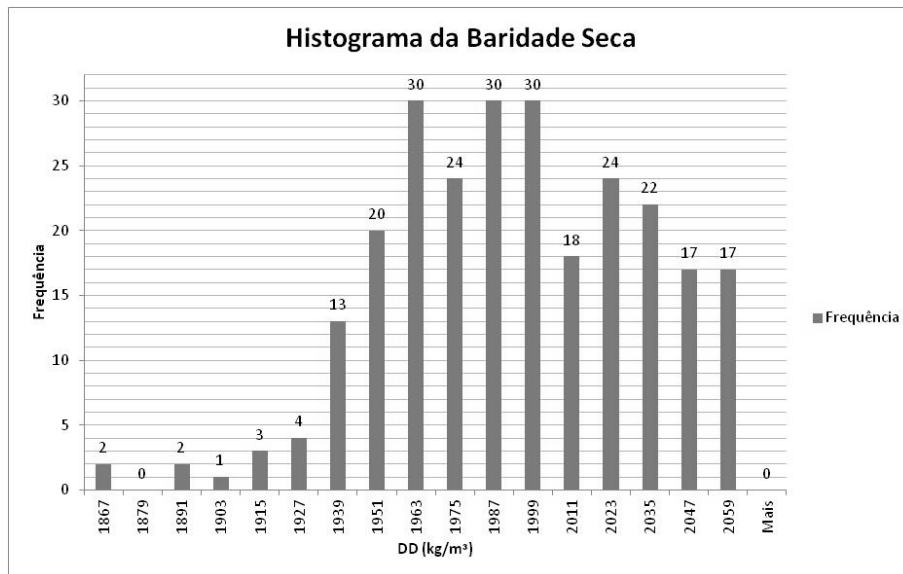


Figura 40 - Gráfico representativo da evolução da baridade seca.

No histograma apresentado na Figura 40 verifica-se que os valores com maior representatividade estão compreendidos entre 1951 a 1963 kg/m^3 e 1975 a 1999 kg/m^3 . O valor da média (1987 kg/m^3) enquadra-se neste último intervalo, enquanto o valor obtido no ensaio Proctor encontra-se num bloco de valores com menor frequência.

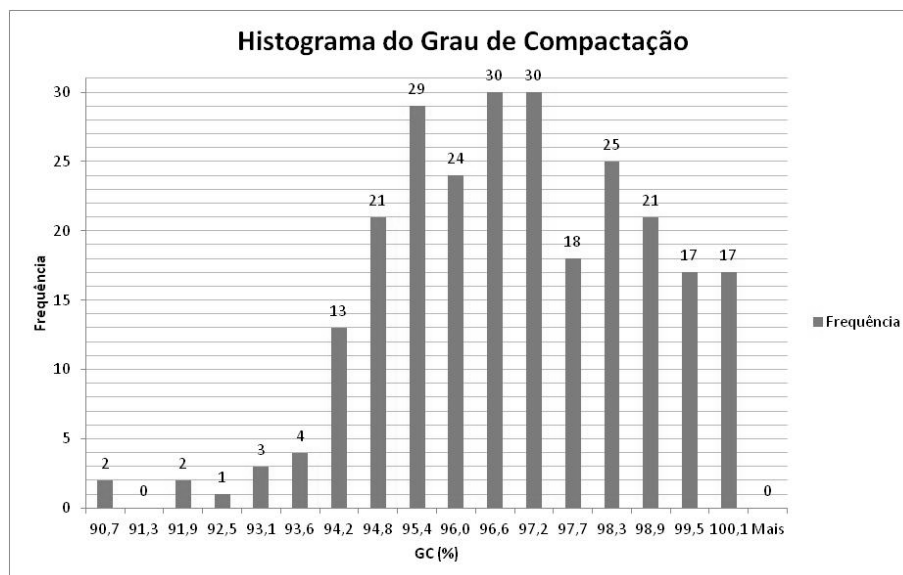


Figura 41 – Histograma para o grau de compactação.

No histograma apresentado na Figura 41 verifica-se que os valores com maior representatividade estão compreendidos entre 94,8 a 95,4% e 96,0 a 97,2%. O valor da média (96,6%) enquadra-se neste último intervalo, ou seja, obteve-se um elevado grau de compactação.

Análise da baridade húmida:

No Quadro 31 estão resumidos os valores obtidos das medidas amostrais calculadas para o parâmetro WD.

Quadro 31 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro da baridade húmida.

Camadas / Cotas (m)		WD (kg/m ³)					
		Média	Máximo	Mínimo	Amplitude	Desvio padrão	Coef. De Variação
1	316,6	2081	2162	1979	183	49	2,4
	325,1						
2	317,0	2081	2154	1980	174	43	2,1
3	317,4	2067	2131	1978	153	45	2,2
4	317,8	2102	2198	2015	183	56	2,7
5	318,2	2127	2185	2047	138	37	1,7
6	318,6	2127	2240	2035	205	52	2,4
7	318,9	2124	2185	2084	101	31	1,5
8	319,3	2148	2198	2105	93	32	1,5
9	319,7	2125	2162	2062	100	24	1,1
10	320,2	2127	2204	2030	174	63	3,0
11	320,6	2160	2233	2106	127	43	2,0
12	321,0	2122	2181	2012	169	50	2,4
	330,0						
13	321,4	2106	2191	2018	173	62	2,9
	330,4						
14	330,8	2039	2055	2012	43	14	0,7
15	322,2	2139	2148	2123	25	11	0,5
-	322,9	2154	2171	2145	26	10	0,5
-	389,2	2073	2168	1994	174	50	2,4
-	318,3	2064	2116	2033	83	35	1,7

Os resultados, registados em toda a área referente ao solo A1162, apresentam um mínimo de 1978 kg/m³ e um máximo de 2240 kg/m³. O valor médio é de 2108 kg/m³.

Verifica-se que, no geral, as camadas apresentam valores homogéneos e pouco dispersos em relação aos valores médios. No entanto, nas camadas n.º 9, 14, 15 e à cota 322,9 m os valores do desvio padrão e do coeficiente de variação são menores que os restantes. Isto pode dever-se ao número reduzido de ensaios realizados nestas camadas, uma vez que estas medidas são muito influenciadas por erros ou observações muito afastadas.

Na Figura 42 está representada graficamente a evolução da WD, em função das camadas, e a sua comparação com o valor da média de cada camada.

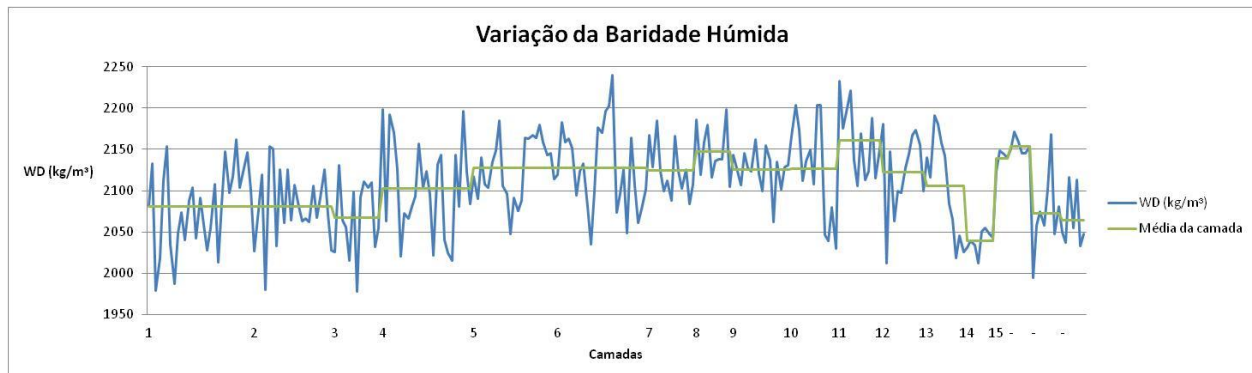


Figura 42 – Gráfico representativo da evolução da baridade húmida.

Análise do teor em água:

No Quadro 32 estão resumidos os valores obtidos das medidas amostrais calculadas para o parâmetro W.

Quadro 32 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro do teor em água.

Camadas / Cotas (m)	W (%)						
	Média	Máximo	Mínimo	Amplitude	Desvio padrão	Coef. De Variação	
1	316,6 325,1	5,0	7,2	2,7	4,5	1,3	25,4
2	317,0	5,3	6,7	3,5	3,2	0,9	16,7
3	317,4	5,2	7,6	3,6	4,0	1,2	22,5
4	317,8	6,1	9,7	3,5	6,2	1,7	27,4
5	318,2	6,8	10,5	4,2	6,3	1,7	25,4
6	318,6	6,3	9,8	3,9	5,9	1,5	23,9
7	318,9	6,0	9,2	4,3	4,9	1,3	20,9
8	319,3	6,6	9,5	5,1	4,4	1,2	17,7
9	319,7	7,4	9,9	4,2	5,7	1,6	21,3
10	320,2	6,9	8,6	3,2	5,4	1,8	25,8
11	320,6	8,2	10,4	6,4	4,0	1,2	14,4
12	321,0 330,0	7,0	9,8	4,4	5,4	1,8	26,5
13	321,4 330,4	5,3	7,9	3,8	4,1	1,4	26,4
14	330,8	3,7	4,5	3,0	1,5	0,5	12,6
15	322,2	7,0	8,7	5,8	2,9	1,3	19,1
-	322,9	6,8	7,7	6,2	1,5	0,5	7,4
-	389,2	5,8	7,4	4,0	3,4	1,0	18,0
-	318,3	3,9	5,3	2,5	2,8	1,0	26,7

O W medido *in situ* apresenta valores entre os 2,5 e os 10,5% em toda a extensão ensaiada, com um valor médio de 6,1%. O valor obtido em laboratório com o ensaio Proctor foi de 8,2%.

Os valores do desvio padrão estão muito próximos dos valores médios dos teores em água, o que evidencia pequenos desvios nos valores medidos, tal como se pode constatar pelos resultados do coeficiente de variação.

Na Figura 43 está representado o gráfico que mostra a evolução do W, ao longo das diferentes camadas, a sua comparação com o valor da média obtido de cada camada e com o valor obtido em laboratório.

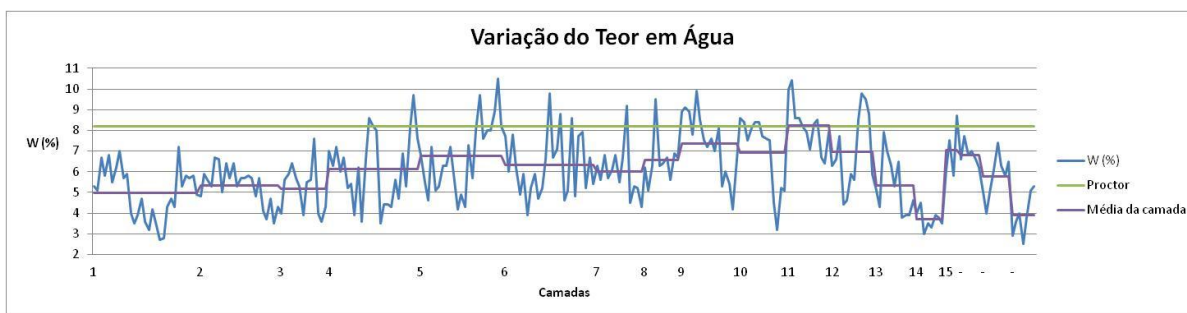


Figura 43 - Gráfico representativo da evolução do teor em água.

Relativamente à variação dos valores do W, pode-se considerar que a maior percentagem dos valores (87,2%) é inferior ao W_{ot} (corresponde ao ramo seco da curva de compactação), 11,7% dos valores são maiores, 1,2% coincidentes.

O solo tenderá a apresentar elevada resistência ao corte, aumentando com a energia de compactação; a variação da pressão da água nos vazios do solo será praticamente nula, quando sujeito a carregamento; poderão surgir fissuras e ocorrer expansão/colapso do solo, quando sujeito a aumento do W.

Análise da baridade seca:

No Quadro 33 estão resumidos os valores obtidos das medidas amostrais calculadas para o parâmetro DD.

Quadro 33 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro da baridade seca.

Camadas / Cotas (m)		DD (kg/m ³)					
		Média	Máximo	Mínimo	Amplitude	Desvio padrão	Coef. De Variação
1	316,6	1982	2053	1855	198	53	2,7
	325,1						
2	317,0	1976	2030	1880	150	36	1,8
3	317,4	1965	2029	1904	125	39	2,0
4	317,8	1981	2054	1918	137	46	2,3
5	318,2	1993	2056	1941	114	32	1,6
6	318,6	2001	2059	1944	116	40	2,0
7	318,9	2004	2046	1944	102	29	1,5
8	319,3	2015	2058	1973	85	28	1,4
9	319,7	1980	2044	1935	109	32	1,6
10	320,2	1989	2049	1931	118	38	1,9
11	320,6	1997	2051	1951	100	37	1,8
12	321,0	1984	2052	1887	164	38	1,9
	330,0						
13	321,4	1999	2038	1937	101	41	2,1
	330,4						
14	330,8	1967	1985	1944	42	15	0,8
15	322,2	1999	2026	1969	58	24	1,2
-	322,9	2017	2028	2005	24	8	0,4
-	389,2	1959	2040	1899	140	41	2,1
-	318,3	1987	2036	1934	101	41	2,1

A DD *in situ* apresenta um valor mínimo de 1855 kg/m³ e um valor máximo de 2059 kg/m³, com uma amplitude de 204 kg/m³. O valor médio é 1987 kg/m³ e em relação ao valor do ensaio Proctor (2058 kg/m³) apresenta uma diferença de 71 kg/m³, ou seja, um desvio pouco significativo.

Verifica-se que nas camadas n.º 14, 15 e à cota 322,9 m os valores do desvio padrão e do coeficiente de variação são menores que os restantes. Assim, estes parâmetros têm menor variabilidade em relação à média e são mais homogêneos. Isto pode dever-se ao número de ensaios realizados nestas camadas, uma vez que estas medidas são muito influenciadas por erros ou observações muito afastadas.

Na Figura 44 está representado o gráfico que mostra a evolução da DD, em função das camadas, a sua comparação com o valor da média de cada camada e com o valor obtido em laboratório.

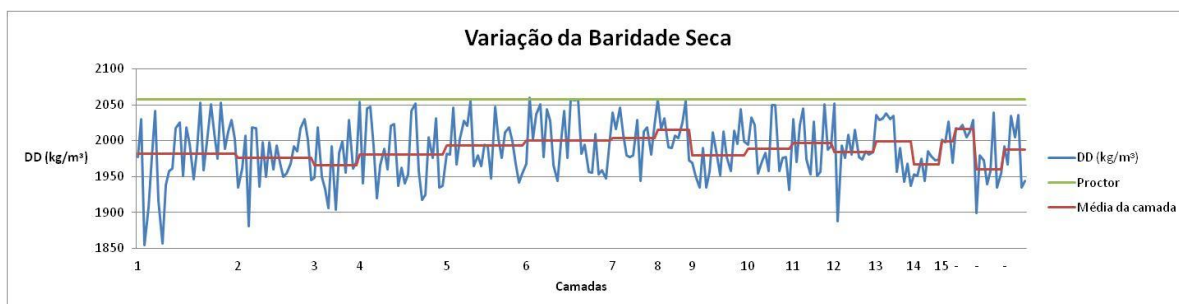


Figura 44 – Gráfico representativo da variação da baridade seca.

Os valores médios da baridade seca *in situ* para cada camada não apresentam grande variação entre si, mantendo-se quase a totalidade dos valores (98,8%) inferiores ao valor máximo obtido no laboratório (2058 kg/m³).

Análise do grau de compactação:

No Quadro 34 estão resumidos os valores obtidos das medidas amostrais calculadas para o parâmetro GC.

Quadro 34 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro do grau de compactação.

Camadas / Cotas (m)	GC (%)						
	Média	Máximo	Mínimo	Amplitude	Desvio padrão	Coef. De Variação	
1	316,6 325,1	96,3	99,8	90,1	9,6	2,6	2,7
2	317,0	96,0	98,6	91,4	7,3	1,7	1,8
3	317,4	95,5	98,6	92,5	6,1	1,9	2,0
4	317,8	96,3	99,8	93,2	6,6	2,3	2,3
5	318,2	96,8	99,9	94,3	5,6	1,6	1,6
6	318,6	97,2	100,1	94,4	5,6	2,0	2,0
7	318,9	97,4	99,4	94,5	5,0	1,4	1,5
8	319,3	97,9	100,0	95,9	4,1	1,4	1,4
9	319,7	96,2	99,3	94,0	5,3	1,5	1,6
10	320,2	96,6	99,6	93,9	5,7	1,8	1,9
11	320,6	97,0	99,6	94,8	4,8	1,8	1,8
12	321,0 330,0	96,4	99,7	91,7	8,0	1,8	1,9
13	321,4 330,4	97,1	99,0	94,1	4,9	2,0	2,1
14	330,8	95,6	96,5	94,5	2,0	0,7	0,8
15	322,2	97,1	98,5	95,7	2,8	1,1	1,2
-	322,9	98,0	98,6	97,4	1,1	0,4	0,4
-	389,2	95,2	99,1	92,3	6,8	2,0	2,1
-	318,3	96,6	98,9	94,0	4,9	2,0	2,1

O grau de compactação encontra-se entre os 90,1% e os 100,0%, com uma média de 96,6%.

Este parâmetro apresenta valores do desvio padrão e do coeficiente de variação baixos, o que significa uma menor dispersão dos resultados em relação aos valores médios, logo são resultados homogêneos. As camadas n.º 14, 15 e à cota 322,9 m têm valores mais reduzidos, em relação ao geral.

Na Figura 45 está representado o gráfico que mostra a evolução do GC ao longo das diferentes camadas, a sua comparação com o valor da média e com o valor médio calculado de cada camada.

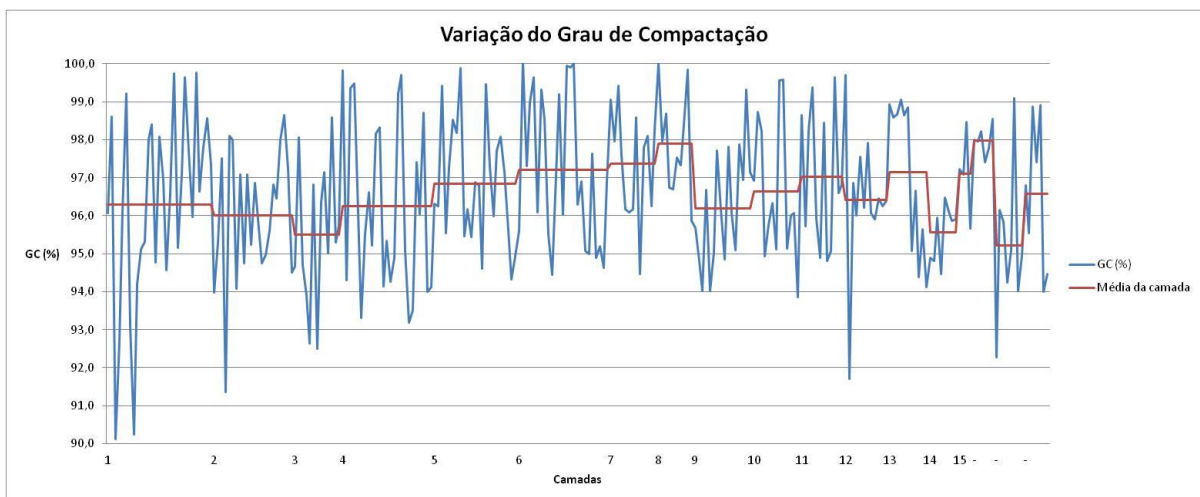


Figura 45 - Gráfico representativo da evolução do grau de compactação.

O GC varia de modo semelhante ao longo das camadas, no entanto ocorrem algumas medições pontuais de valores entre 90 e 94%.

Na Figura 46 está representada a evolução do GC em função dos valores dos teores em água iguais ou inferiores ao valor do ensaio Proctor. Verifica-se que 88,3% dos valores do W medidos estão representados neste gráfico, ou seja, a compactação foi realizada segundo o ramo seco da curva de compactação. Assim, é de esperar que o solo apresente elevada resistência ao corte e variações praticamente nulas da pressão da água nos vazios do solo, quando sujeito a carregamento.

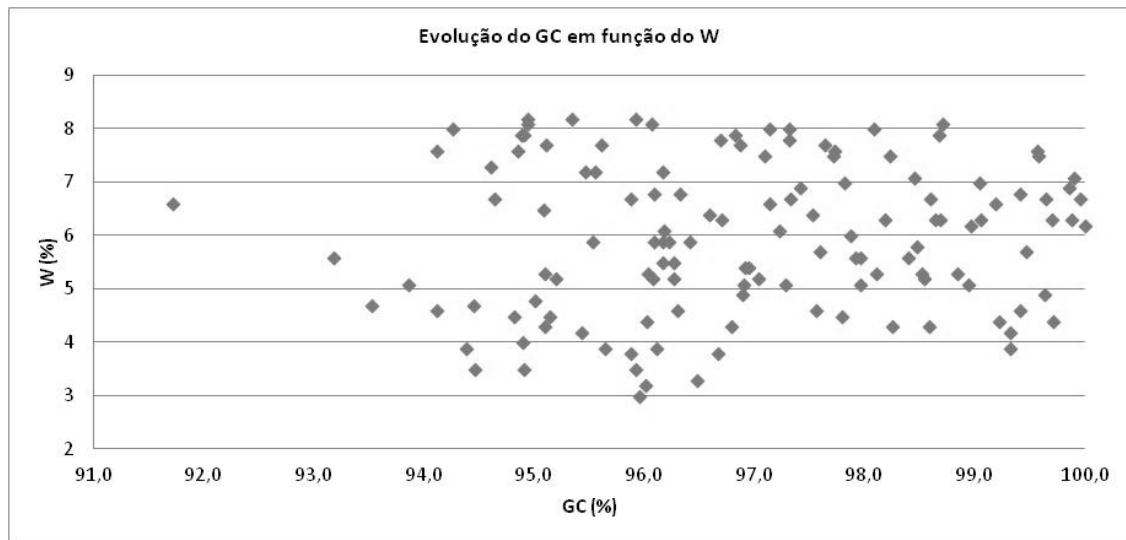


Figura 46 - Evolução do grau de compactação em função do teor em água.

Na Figura 47 está representada a variação do GC em função dos valores dos teores em água superiores ao W_{ot} (11,7% do total medido).

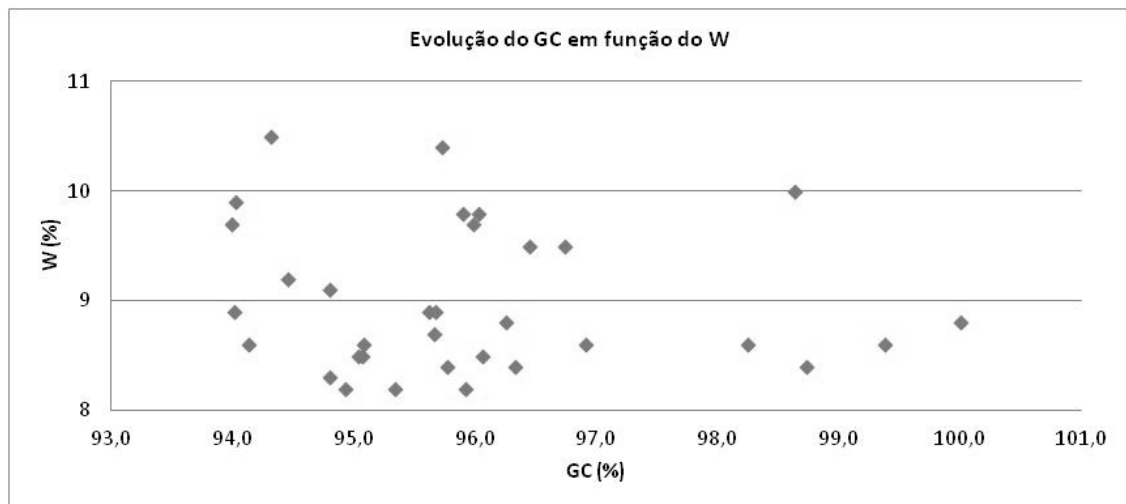


Figura 47 – Evolução do grau de compactação em função do teor em água.

Agregado:

O controlo da compactação do material agregado foi realizado em duas camadas na base do pavimento no interior da ETAR e na rua de acesso à mesma.

Na Figura 48 está representado um esquema da ordem das camadas do AGE, quer para a base do pavimento no interior da ETAR como para a via de acesso à mesma.



Figura 48 – Esquema simplificado da ordem das camadas para o AGE.

Na Figura 49 está representado o número de ensaios realizados no agregado nas camadas da base do pavimento no interior da ETAR e na via de acesso à mesma.

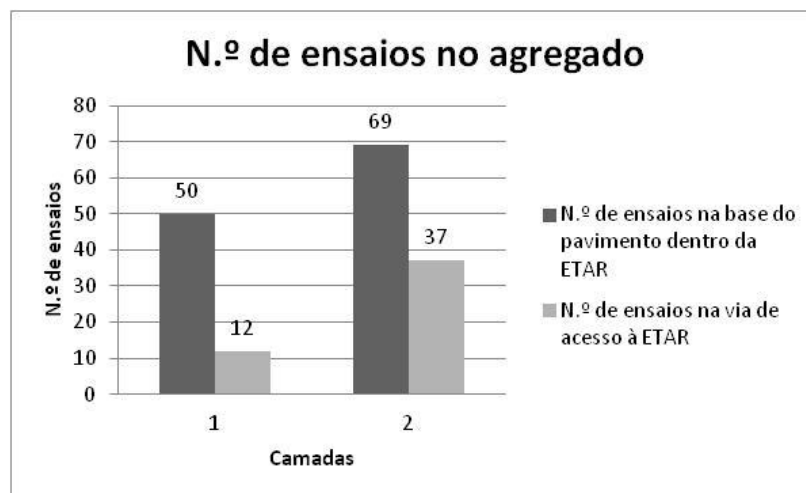


Figura 49 – Gráfico representativo do n.º de ensaios realizados em cada camada de agregado.

Nos ensaios laboratoriais o material apresentou uma $\gamma_{d, \text{máx}}$ de 2223 kg/m³ e um W_{ot} de 5,0%.

O Quadro 35 mostra os resultados dos ensaios realizados na base do pavimento da ETAR, considerando os parâmetros da baridade húmida (WD), do teor em água (W), da baridade seca (DD) e do grau de compactação (GC).

Quadro 35 - Resultados obtidos nos ensaios *in situ* para cada camada de agregado da base do pavimento.

Camada	WD (kg/m ³)	W (%)	DD (kg/m ³)	GC (%)	Camada	WD (kg/m ³)	W (%)	DD (kg/m ³)	GC (%)	
1	2319	6,5	2177	98,0	1	2286	3,2	2215	99,6	
	2199	4,4	2106	94,8		2282	3,2	2211	99,5	
	2207	5,2	2098	94,4		2198	3,9	2115	95,2	
	2229	3,1	2162	97,3		2338	6,2	2202	99,0	
	2324	6,1	2190	98,5		2189	3,7	2111	95,0	
	2255	4,5	2158	97,1		2302	4,0	2213	99,6	
	2278	4,9	2172	97,7		2262	6,3	2128	95,7	
	2258	4,8	2155	96,9		2166	2,2	2119	95,3	
	2210	3,9	2127	95,7		2207	4,1	2120	95,4	
	2270	4,2	2179	98,0		2301	3,5	2223	100,0	
	1	2313	5,0	2203	99,1	2	2263	2,9	2199	98,9
		2312	6,0	2181	98,1		2228	2,4	2176	97,9
		2312	5,5	2191	98,6		2259	3,2	2189	98,5
		2258	3,4	2184	98,2		2286	3,1	2217	99,7
		2210	4,1	2123	95,5		2243	2,6	2186	98,3
		2290	3,5	2213	99,5		2178	2,0	2135	96,1
		2301	4,3	2206	99,2		2270	3,2	2200	98,9
		2272	4,2	2180	98,1		2252	2,2	2204	99,1
		2225	4,4	2131	95,9		2221	3,6	2144	96,4
		2285	2,8	2223	100,0		2255	3,5	2179	98,0
2192		3,6	2116	95,2	2198		2,4	2146	96,6	
2217		2,3	2167	97,5	2275		3,8	2192	98,6	
2166		2,2	2119	95,3	2249		2,7	2190	98,5	
2250		4,0	2163	97,3	2223		3,5	2148	96,6	
2210		4,1	2123	95,5	2185		3,3	2115	95,2	
2225		4,4	2131	95,9	2246		2,5	2191	98,6	
2210		3,9	2127	95,7	2219		3,2	2150	96,7	
2204		4,2	2115	95,1	2178		2,8	2119	95,3	
2271		3,4	2196	98,8	2136		1,6	2102	94,6	
2188		3,6	2112	95,0	2180		1,7	2144	96,4	
2235	2,6	2178	98,0	2213	1,6	2178	98,0			
2168	2,7	2111	95,0	2284	3,0	2217	99,8			
2261	2,0	2217	99,7	2214	2,9	2152	96,8			
2256	2,2	2207	99,3	2300	5,9	2172	97,7			
2236	3,0	2171	97,7	2202	3,0	2138	96,2			
2142	1,6	2108	94,8	2207	4,1	2120	95,4			
2197	3,0	2133	96,0	2205	2,7	2147	96,6			
2146	2,7	2090	94,0	2276	3,3	2203	99,1			
2199	1,7	2162	97,3	2187	3,3	2117	95,2			
2204	2,7	2146	96,5	2216	2,7	2158	97,1			
2245	2,5	2190	98,5	2287	3,8	2203	99,1			

Quadro 35. 1 - Resultados obtidos nos ensaios *in situ* para cada camada de agregado da base do pavimento (continuação).

Camada	WD (kg/m ³)	W (%)	DD (kg/m ³)	GC (%)	Camada	WD (kg/m ³)	W (%)	DD (kg/m ³)	GC (%)
2	2267	2,9	2203	99,1	2	2282	3,3	2209	99,4
	2249	3,2	2179	98,0		2263	3,1	2195	98,7
	2238	3,6	2160	97,2		2300	4,0	2212	99,5
	2266	3,2	2196	98,8		2313	4,1	2222	100,0
	2257	3,7	2176	97,9		2294	4,0	2206	99,2
	2226	2,9	2163	97,3		2304	3,6	2224	100,0
	2235	3,0	2170	97,6		2219	3,8	2138	96,2
	2292	3,3	2219	99,8		2260	3,3	2188	98,4
	2283	3,3	2210	99,4		2272	2,6	2214	99,6
	2196	3,0	2132	95,9		2319	4,9	2211	99,4
	2292	3,7	2210	99,4		2255	2,2	2206	99,3
	2282	3,0	2216	99,7		2298	4,5	2199	98,9
	2299	4,1	2208	99,3		2262	3,7	2181	98,1
	2308	3,9	2221	99,9		2307	4,0	2218	99,8
	2299	3,9	2213	99,5		2189	3,5	2115	95,1
	2218	3,1	2151	96,8		2304	6,3	2167	97,5
	2246	3,2	2176	97,9		2236	3,4	2162	97,3
	2246	4,3	2153	96,9					
	2306	4,2	2213	99,6					
	2196	3,3	2126	95,6					

Os histogramas determinados para o agregado dividem os valores obtidos em cada parâmetro em 11 classes.

Seguidamente, nas Figuras 50, 51, 52 e 53 são apresentados os gráficos que demonstram a frequência com que determinado intervalo de valores se repete ao longo das medições.

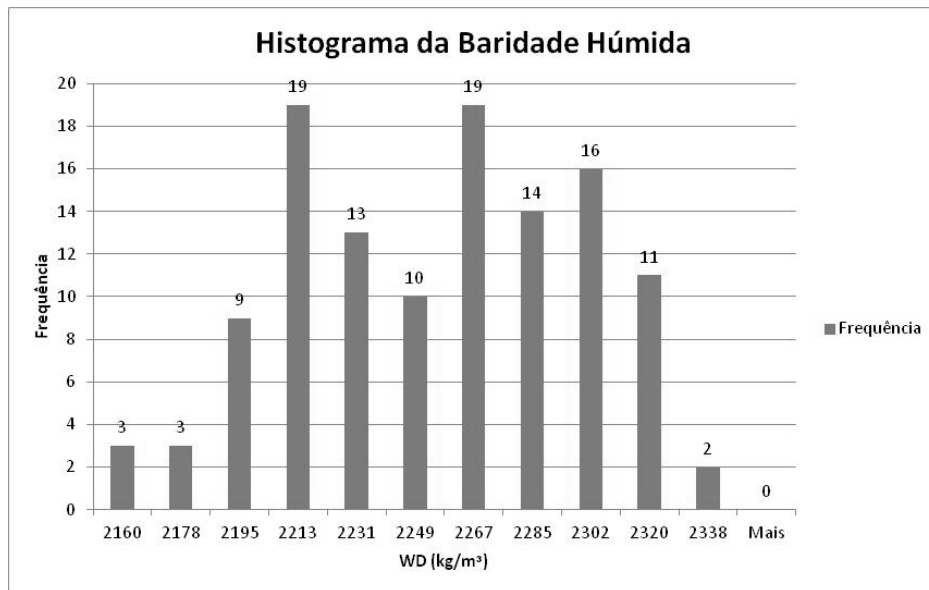


Figura 50 – Histograma da baridade húmida.

No histograma apresentado na Figura 50 verifica-se que os principais intervalos são 2195 a 2213 kg/m³ e 2249 a 2267 kg/m³.

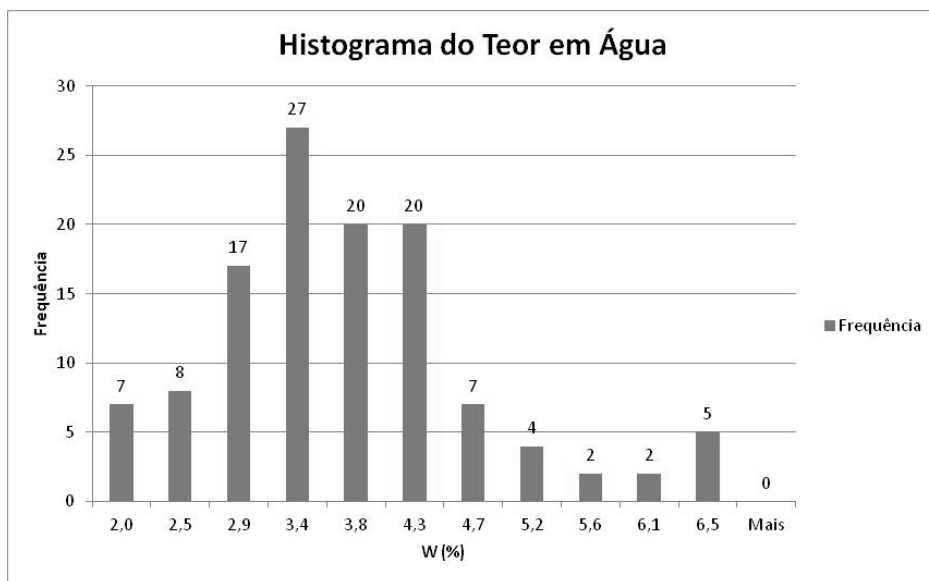


Figura 51 - Histograma do teor em água.

No histograma apresentado na Figura 51 verifica-se que o principal intervalo compreende valores entre 2,9 e 3,4%.

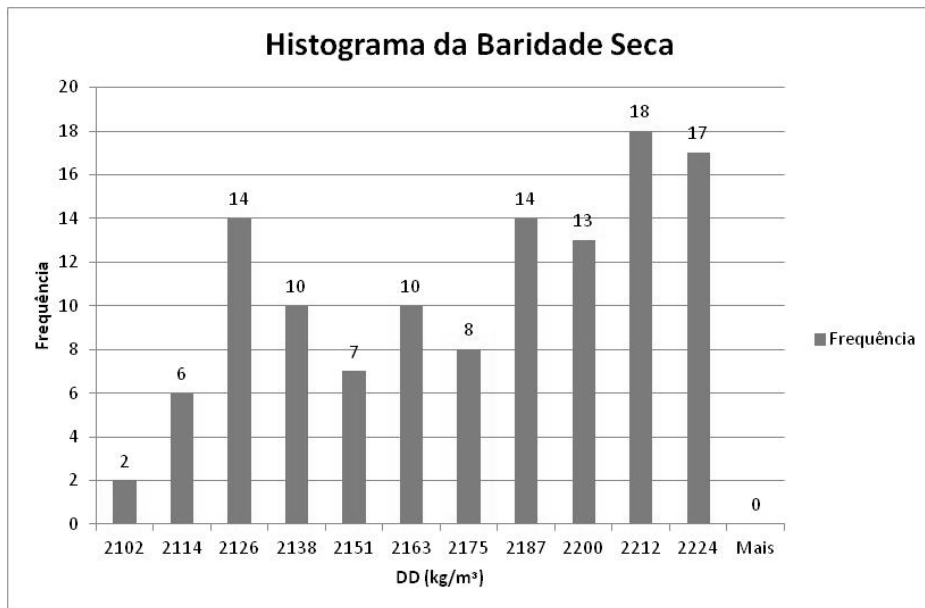


Figura 52 - Histograma da baridade seca.

No histograma apresentado na Figura 52 verifica-se que o principal intervalo é de 2200 a 2224 kg/m³.

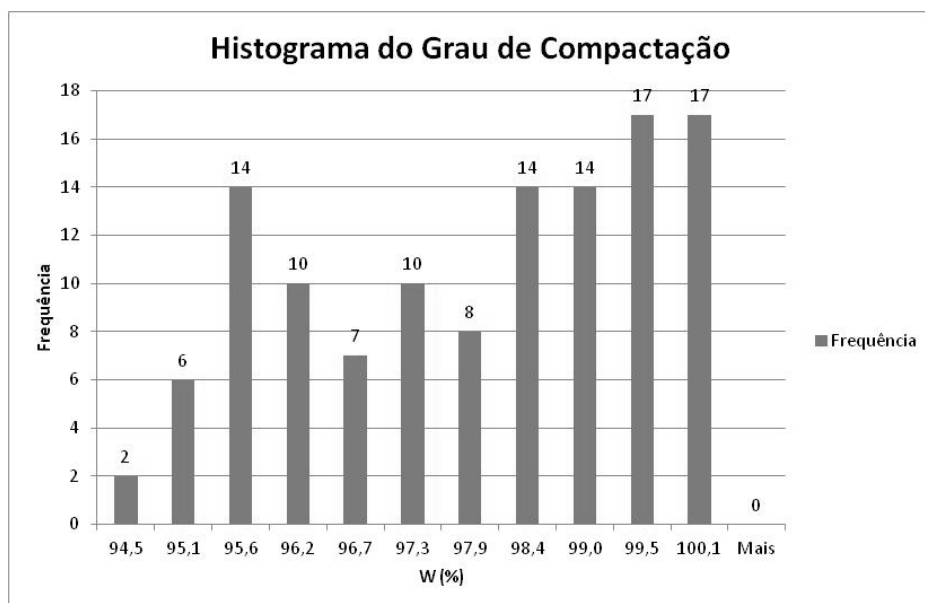


Figura 53 - Histograma do grau de compactação.

No histograma apresentado na Figura 53 verifica-se que o principal intervalo é de 99,0 a 100,1% e um segundo intervalo vai de 97,9 a 99,0%.

Análise da baridade húmida:

No Quadro 36 estão resumidos os valores obtidos das medidas amostrais calculadas para o parâmetro WD.

Quadro 36 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro da baridade húmida.

	WD (kg/m ³)					
	Média	Máximo	Mínimo	Amplitude	Desvio padrão	Coef. De Variação
Camada 1	2239	2338	2142	196	49	2,2
Camada 2	2250	2319	2136	183	42	1,9

Os valores obtidos no cálculo do desvio padrão e do coeficiente de variação demonstram que as medições estão pouco dispersas em relação aos valores médios e são homogéneas.

Na Figura 54 está representado o gráfico que mostra a evolução da WD ao longo das camadas e a sua comparação com o valor da média para cada camada.

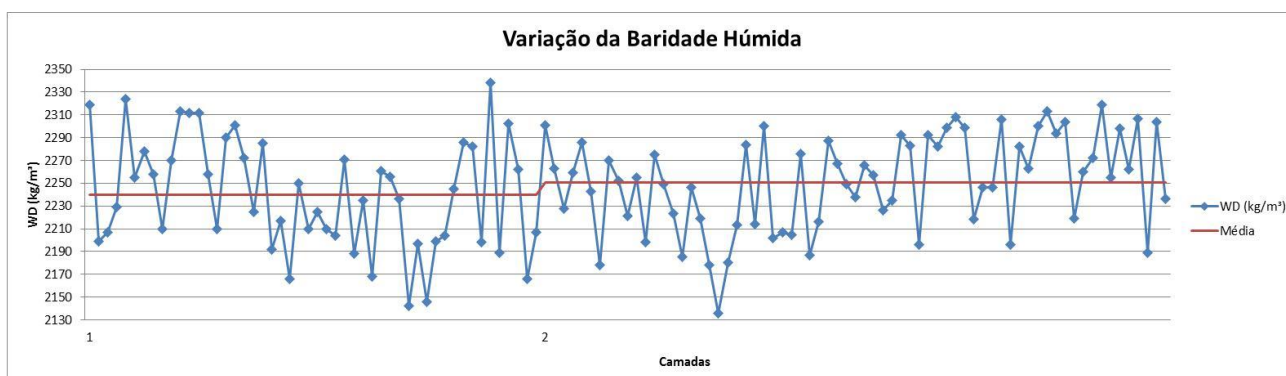


Figura 54 - Gráfico representativo da evolução da baridade húmida.

Análise do teor em água:

No Quadro 37 estão resumidos os valores obtidos das medidas amostrais calculadas para o parâmetro W.

Quadro 37 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro do teor em água.

	W (%)					
	Média	Máximo	Mínimo	Amplitude	Desvio padrão	Coef. De Variação
Camada 1	3,8	6,5	1,6	4,9	1,2	32,3
Camada 2	3,3	6,3	1,6	4,7	0,8	24,7

Na camada mais profunda os valores do desvio padrão estão muito próximos dos valores médios dos teores em água, o que evidencia pequenos desvios nos valores medidos, tal como se pode constatar pelos resultados do coeficiente de variação.

Na Figura 55 está representado o gráfico que mostra a evolução do W, ao longo das camadas, a sua comparação com o valor da média e com o valor obtido em laboratório para cada camada.

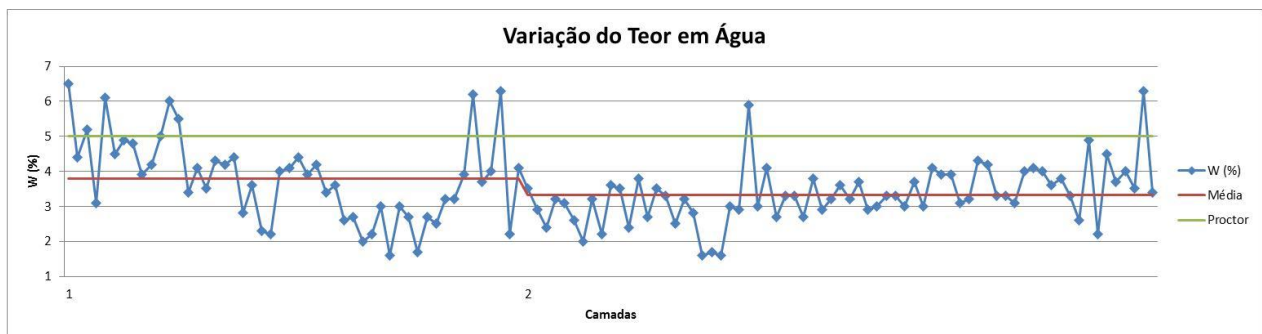


Figura 55 - Gráfico representativo da evolução do teor em água.

Na camada mais profunda 14,0% dos valores são superiores ao W_{ot} , 2,0% são coincidentes e os restantes 84,0% são inferiores. Na camada superficial verifica-se que 2,9% dos valores são superiores ao W_{ot} e 97,1% são inferiores. Na 1ª camada, nos primeiros ensaios, obtiveram-se valores relativamente elevados, acima da média e nas últimas medições teores em água inferiores a 3%. Na 2ª camada os valores encontram-se principalmente entre 2 e 4%, registando-se pontualmente valores mais afastados. A camada em profundidade apresenta teores em água mais elevados que a camada superficial.

Análise da baridade seca:

No Quadro 38 estão resumidos os valores obtidos das medidas amostrais calculadas para o parâmetro DD.

Quadro 38 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro da baridade seca.

	DD (kg/m ³)					
	Média	Máximo	Mínimo	Amplitude	Desvio padrão	Coef. De Variação
Camada 1	2158	2223	2090	133	39	1,8
Camada 2	2178	2223	2102	121	33	1,5

Os valores obtidos no cálculo do desvio padrão e do coeficiente de variação demonstram que as medições estão pouco dispersas em relação aos valores médios e são homogêneas.

Na Figura 56 está representado o gráfico que mostra a evolução da DD, ao longo das camadas, a sua comparação com o valor da média e com o valor obtido em laboratório para cada camada.

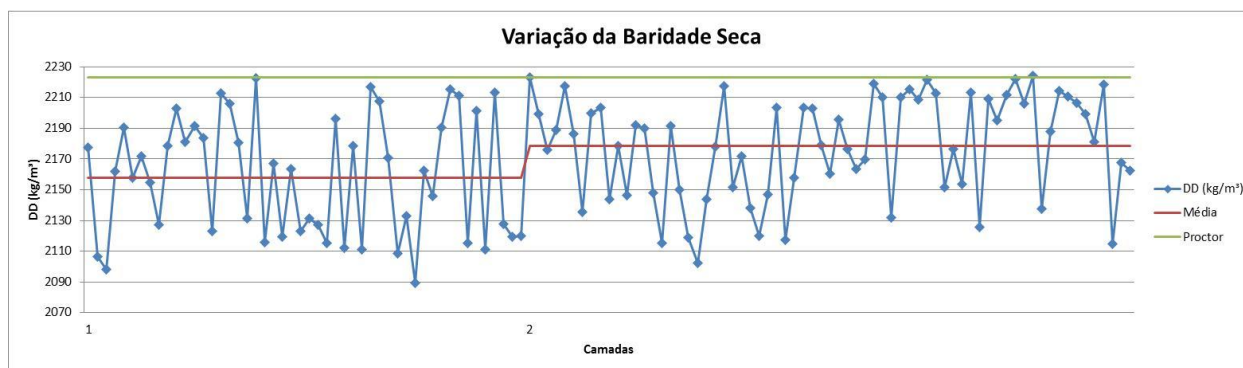


Figura 56 - Gráfico representativo da evolução da baridade seca na primeira camada de agregado.

A baridade seca *in situ* apresenta para a 1ª camada um valor médio menor que o da 2ª camada. Na 1ª camada todos os valores medidos encontram-se abaixo do valor do ensaio do Proctor e na 2ª camada 2,9% dos valores são maiores que o valor laboratorial.

Análise do grau de compactação:

No Quadro 39 estão resumidos os valores obtidos das medidas amostrais calculadas para o parâmetro GC.

Quadro 39 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro do grau de compactação.

	GC (%)					
	Média	Máximo	Mínimo	Amplitude	Desvio padrão	Coef. De Variação
Camada 1	97,1	100,0	94,0	6,0	1,7	1,8
Camada 2	97,9	100,0	94,5	5,5	1,5	1,5

Os valores obtidos no cálculo do desvio padrão e do coeficiente de variação demonstram que as medições estão pouco dispersas em relação aos valores médios e são homogéneas.

Na Figura 57 está representado o gráfico que mostra a evolução do GC, ao longo das camadas, a sua comparação com o valor da média e com o valor médio calculado para cada camada.

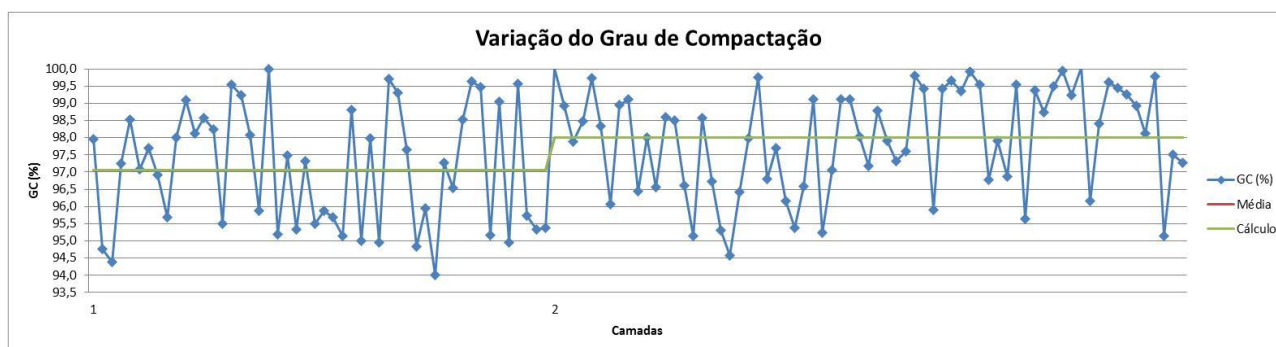


Figura 57 - Gráfico representativo da evolução do grau de compactação na primeira camada de agregado.

No início da 1ª camada os valores são mais elevados, oscilando entre 97 e 100%, seguindo-se uma descida para valores na ordem dos 95 a 96%, voltando a subir; na camada da superfície alguns valores iniciais estão entre 98 e 100%, seguem-se várias medições com a maioria dos valores entre 95 e 99%, na segunda metade da camada os valores são na ordem dos 98 a 100%.

Na Figura 58 está representada a evolução do GC em função dos valores dos teores em água iguais ou inferiores ao valor do ensaio Proctor para ambas as camadas. Verifica-se que 92,4% dos valores do W medidos estão representados neste gráfico, ou seja, tal como no solo a compactação foi realizada segundo o ramo seco da curva de compactação.

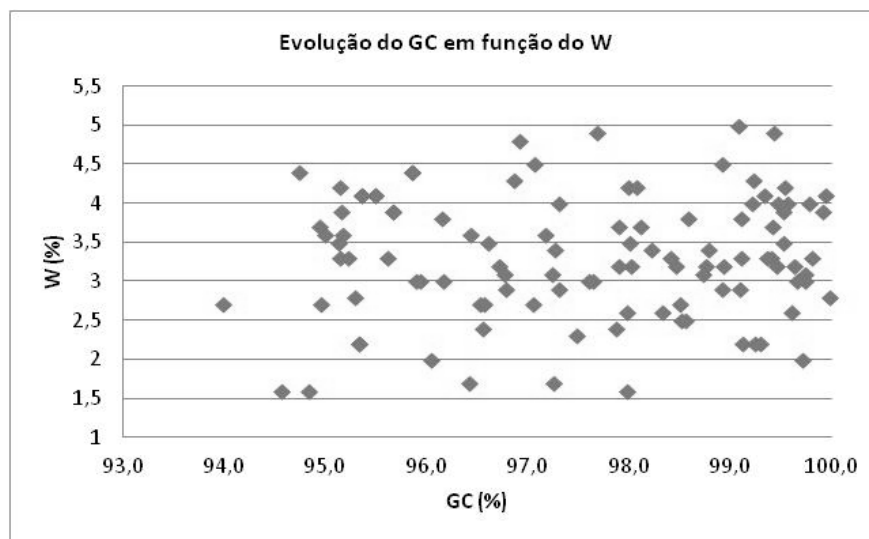


Figura 58 – Evolução do grau de compactação em função do teor em água.

Na Figura 59 estão representados os restantes 7,6% dos teores em água superiores ao W_{ot} .

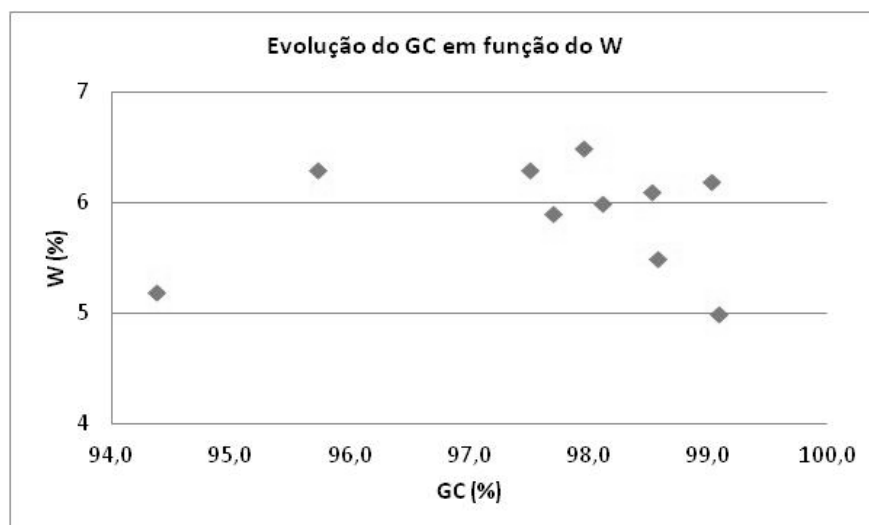


Figura 59 - Evolução do grau de compactação em função do teor em água.

O Quadro 40 mostra os resultados dos ensaios realizados na via de acesso à ETAR, considerando os parâmetros da baridade húmida (WD), do teor em água (W), da baridade seca (DD) e do grau de compactação (GC).

Quadro 40 - Resultados obtidos nos ensaios *in situ* para cada camada de agregado da via de acesso.

Camada	WD (kg/m³)	W (%)	DD (kg/m³)	GC (%)	Camada	WD (kg/m³)	W (%)	DD (kg/m³)	GC (%)
1	2272	3,9	2187	98,4	2	2209	1,3	2181	98,1
	2223	3,4	2150	96,7		2178	1,8	2139	96,2
	2255	3,2	2185	98,3		2158	1,6	2124	95,5
	2232	3,1	2165	97,4		2224	2,0	2180	98,1
	2251	3,0	2185	98,3		2175	2,1	2130	95,8
	2220	2,2	2172	97,7		2156	1,4	2126	95,6
	2209	2,6	2153	96,9		2230	2,8	2169	97,6
	2185	2,0	2142	96,4		2256	2,1	2210	99,4
	2186	2,7	2129	95,8		2184	1,8	2145	96,5
	2216	3,1	2149	96,7		2241	3,2	2172	97,7
	2240	2,9	2177	97,9		2185	1,8	2146	96,6
	2169	2,5	2116	95,2		2167	1,6	2133	95,9
	2	2229	2,7	2170		97,6	2248	2,4	2195
2275		3,1	2207	99,3					
2237		3,4	2163	97,3					
2206		3,6	2129	95,8					
2227		2,3	2177	97,9					
2289		4,6	2188	98,4					
2228		3,0	2163	97,3					
2287		3,5	2210	99,4					
2217		3,1	2150	96,7					
2197		1,9	2156	97,0					
2178		2,8	2119	95,3					
2225		4,5	2129	95,8					
2196		2,5	2142	96,4					
2204		2,9	2142	96,4					
2201		2,9	2139	96,2					
2248		2,4	2195	98,8					
2280		3,0	2214	99,6					
2259		2,3	2208	99,3					
2247		2,3	2196	98,8					
2191		2,2	2144	96,4					
2243	2,1	2197	98,8						
2162	1,8	2124	95,5						
2214	1,7	2177	97,9						
2201	1,4	2171	97,6						

Os histogramas determinados para o agregado aplicado na via de acesso à ETAR dividem os valores obtidos em cada parâmetro em 7 classes.

Seguidamente, nas Figuras 60, 61, 62 e 63 são apresentados os gráficos que demonstram a frequência com que determinado intervalo de valores se repete ao longo das medições.

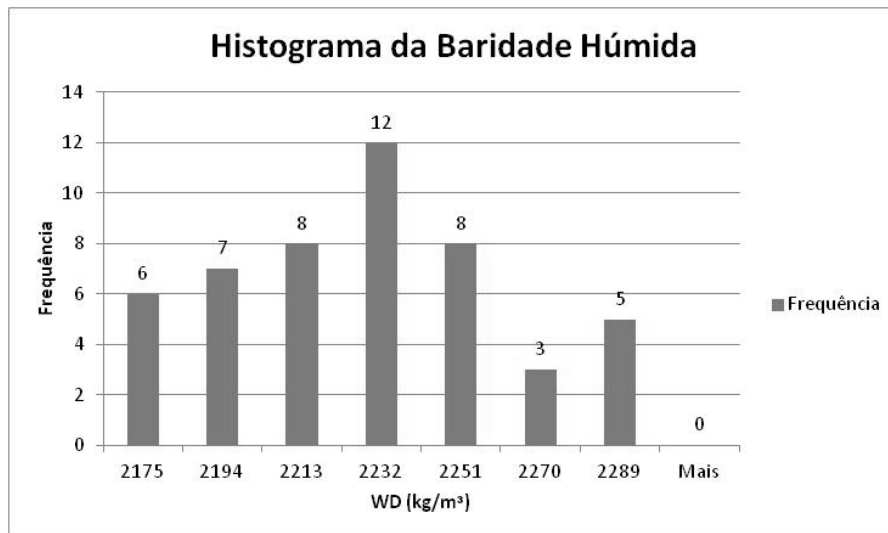


Figura 60 – Histograma para a baridade húmida.

No histograma apresentado na Figura 60 verifica-se que o bloco de valores de maior frequência é o 2213 a 2232 kg/m³. A média das camadas está neste intervalo.

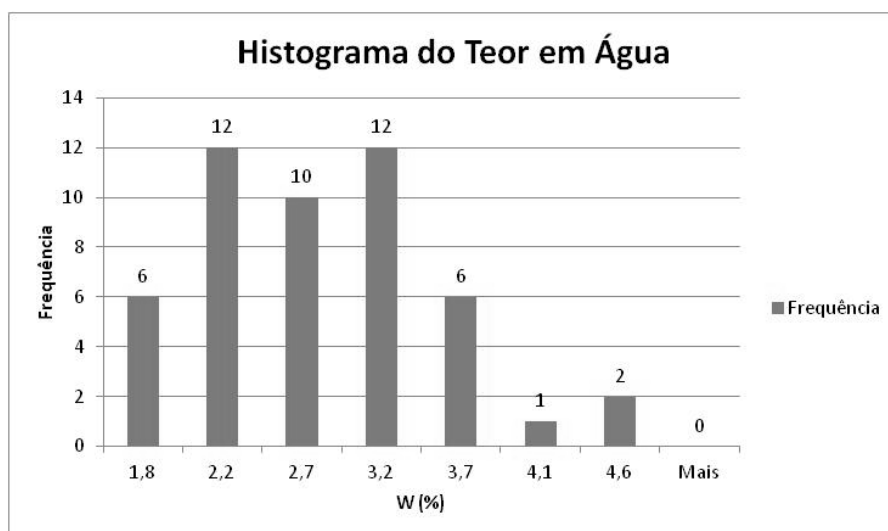


Figura 61 - Histograma para o teor em água.

No histograma apresentado na Figura 61 os valores de maior frequência estão entre 1,8 e 3,2%. O valor de ambas as médias integra este grupo.

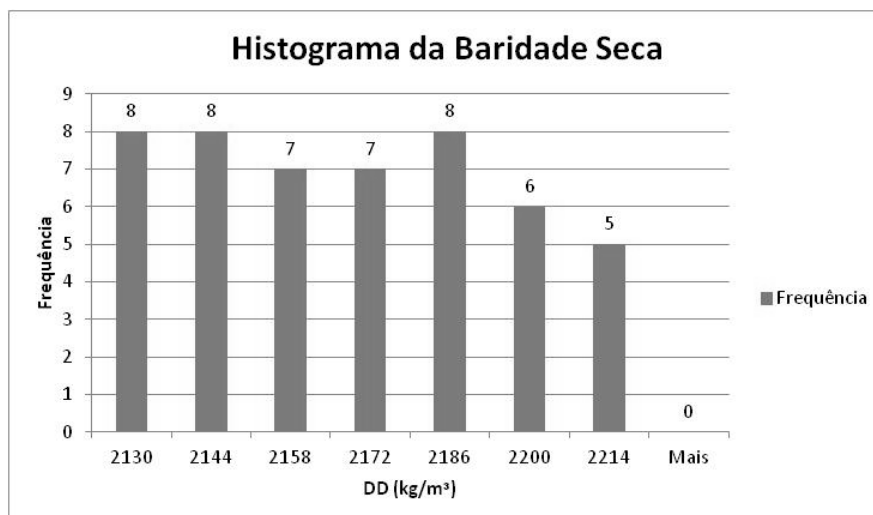


Figura 62 - Histograma para a baridade seca.

No histograma apresentado na Figura 62 verifica-se que os principais valores estão entre 2116 e 2186 kg/m³.

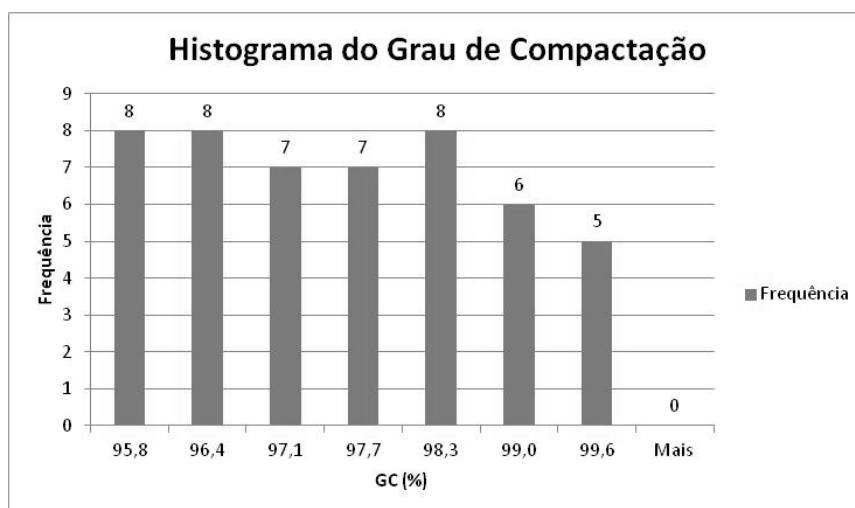


Figura 63 - Histograma para o grau de compactação.

No histograma apresentado na Figura 63 os valores de maior frequência estão entre 95,2 e 98,3%.

Análise da baridade húmida:

No Quadro 41 estão resumidos os valores obtidos das medidas amostrais calculadas para o parâmetro WD.

Quadro 41 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro da baridade húmida.

	WD (kg/m ³)					
	Média	Máximo	Mínimo	Amplitude	Desvio padrão	Coef. De Variação
Camada 1	2221	2272	2169	103	31	1,4
Camada 2	2217	2289	2156	133	36	1,6

Os valores obtidos no cálculo do desvio padrão e do coeficiente de variação demonstram que as medições estão pouco dispersas em relação aos valores médios e são homogéneas.

Na Figura 64 está representado o gráfico que mostra a evolução da WD ao longo das camadas e a sua comparação com o valor da média de cada camada.

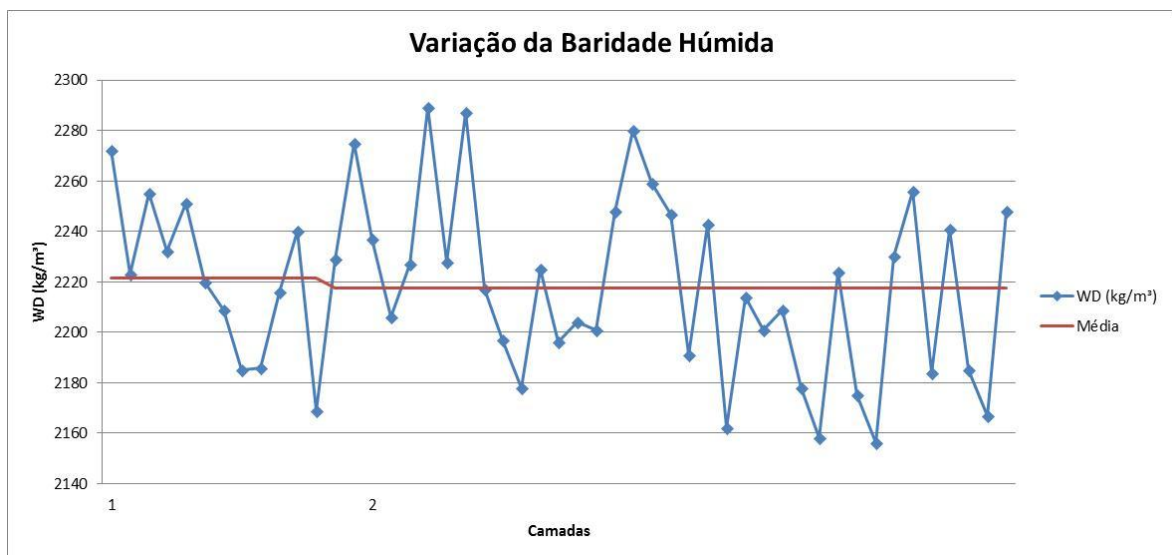


Figura 64 - Gráfico representativo da evolução da baridade húmida.

Análise do teor em água:

No Quadro 42 estão resumidos os valores obtidos das medidas amostrais calculadas para o parâmetro W.

Quadro 42 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro do teor em água.

	W (%)					
	Média	Máximo	Mínimo	Amplitude	Desvio padrão	Coef. De Variação
Camada 1	2,9	3,9	2,0	1,9	0,5	18,2
Camada 2	2,5	4,6	1,3	3,3	0,8	32,2

Na camada mais superficial os valores do desvio padrão estão muito próximos dos valores médios dos teores em água, o que evidencia pequenos desvios nos valores medidos, tal como se pode constatar pelos resultados do coeficiente de variação.

Na Figura 65 está representado o gráfico que mostra a evolução do W, ao longo das camadas, a sua comparação com o valor da média e com o valor obtido em laboratório para cada camada.



Figura 65 - Gráfico representativo da evolução do teor em água.

Os valores medidos dos teores em água são todos inferiores ao w_{ot} (5,0%). Na camada mais profunda mediram-se valores entre 2 e 3,9%; na camada superficial as leituras iniciais são mais elevadas que na 1ª camada (2,5 a 4,6%), mantendo-se os valores acima da média, com exceção de três pontos, na segunda metade das medições verifica-se um decréscimo dos teores (2,5 a 1,3%), abaixo da média.

Análise da baridade seca:

No Quadro 43 estão resumidos os valores obtidos das medidas amostrais calculadas para o parâmetro DD.

Quadro 43 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro da baridade seca.

	DD (kg/m ³)					
	Média	Máximo	Mínimo	Amplitude	Desvio padrão	Coef. De Variação
Camada 1	2159	2187	2116	71	23	1,1
Camada 2	2164	2214	2119	95	29	1,4

Os valores obtidos no cálculo do desvio padrão e do coeficiente de variação demonstram que as medições estão pouco dispersas em relação aos valores médios e são homogéneas.

Na Figura 66 está representado o gráfico que mostra a evolução da DD, ao longo das camadas, a sua comparação com o valor da média e com o valor obtido em laboratório para cada camada.

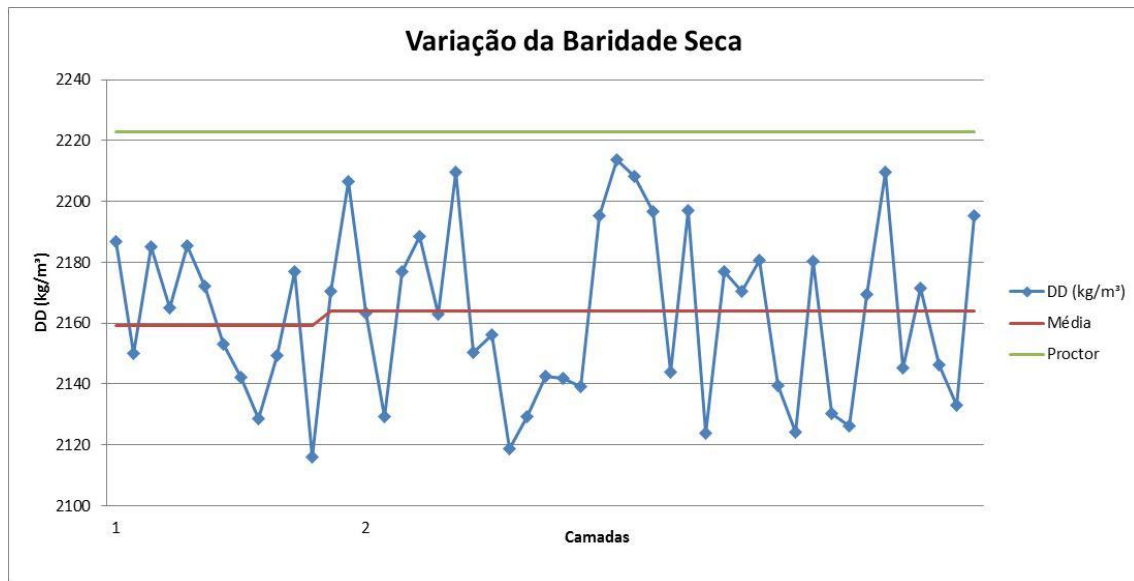


Figura 66 - Gráfico representativo da evolução da baridade seca.

Os valores da baridade seca *in situ* são todos inferiores ao valor laboratorial (2223 kg/m^3). A camada superficial apresenta um valor médio ligeiramente superior ao da camada mais profunda.

Análise do grau de compactação:

No Quadro 44 estão resumidos os valores obtidos das medidas amostrais calculadas para o parâmetro GC.

Quadro 44 - Valores das medidas amostrais calculadas para o parâmetro do grau de compactação.

	GC (%)					
	Média	Máximo	Mínimo	Amplitude	Desvio padrão	Coef. De Variação
Camada 1	97,1	98,4	95,2	3,2	1,0	1,1
Camada 2	97,3	99,6	95,3	4,3	1,3	1,4

Os valores obtidos no cálculo do desvio padrão e do coeficiente de variação demonstram que as medições estão pouco dispersas em relação aos valores médios e são homogêneas.

Na Figura 67 está representado o gráfico que mostra a evolução do GC ao longo das camadas e a sua comparação com o valor da média e da média calculada para cada camada.

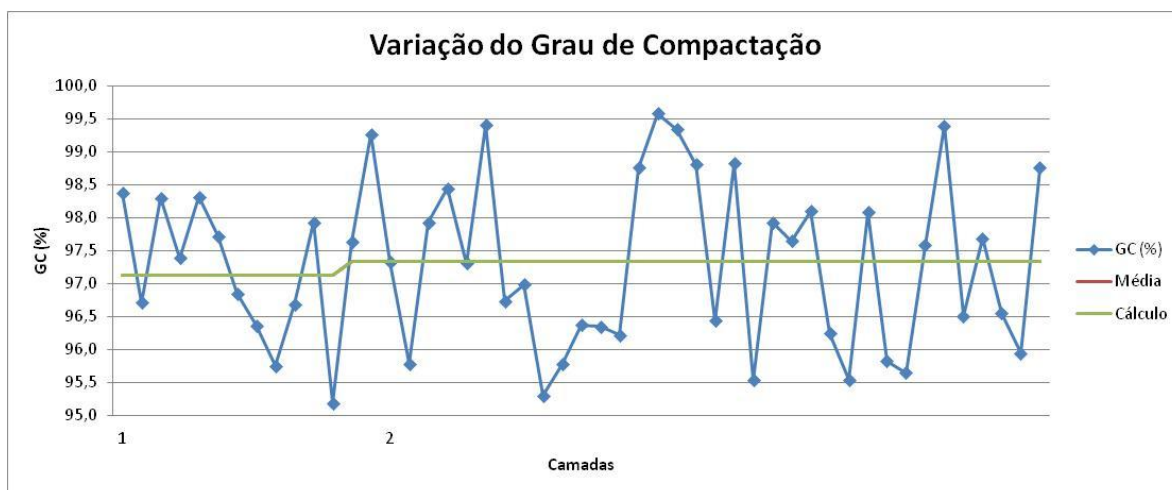


Figura 67 - Gráfico representativo da evolução do grau de compactação.

No início da 1ª camada registaram-se valores mais elevados (96,5 a 98,5%); e na 2ª camada os valores variam de 95,3 a 99,6%.

Na Figura 68 está representada a evolução do GC em função dos valores dos teores em água iguais ou inferiores ao valor do ensaio Proctor para ambas as camadas. Verifica-se que a totalidade dos valores do W medidos estão representados neste gráfico, ou seja, tal como no solo a compactação foi realizada segundo o ramo seco da curva de compactação.

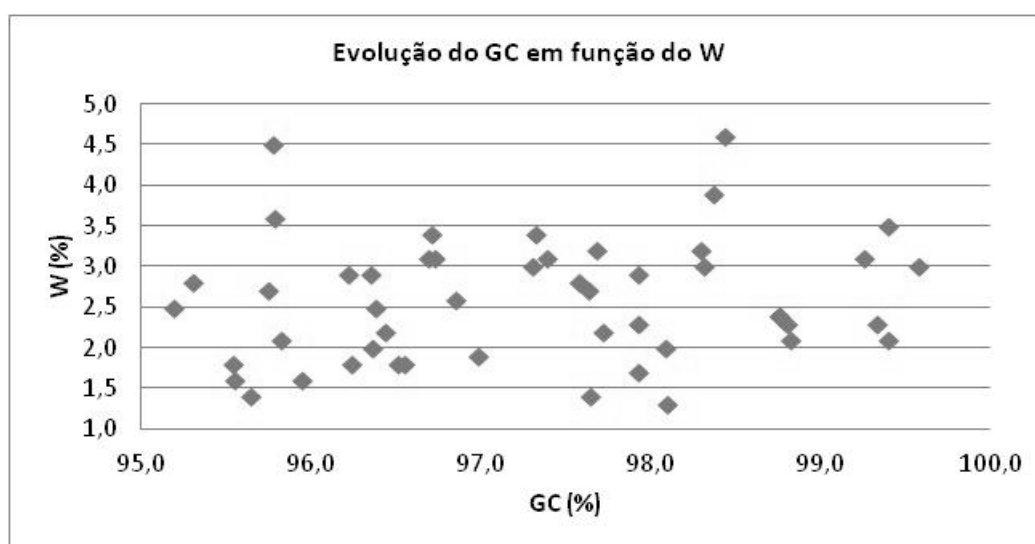


Figura 68 – Evolução do grau de compactação em função do teor em água.

7. Conclusões

7. Conclusões

Para o cumprimento do objetivo deste trabalho, o qual consistiu no controlo da operação de compactação realizada na construção da ETAR de Castelo Branco, foi aplicada a metodologia considerada mais adequada à situação, ou seja, quer na caracterização do material a aterrar, quer nos ensaios de controlo.

Assim, foram apresentados neste trabalho os ensaios laboratoriais realizados na caracterização de um solo (análise granulométrica por peneiração húmida – LNEC E 239: 1970, limites de consistência – NP 143: 1969, teor em água – NP 84: 1965 e ensaio Proctor – LNEC E 197: 1966) e de um AGE (análise granulométrica com lavagem – JAE S:8: 1953, peso específico e absorção de água – JAE P.6-53 e ensaio de compactação de agregados - LNEC E 197: 1966) e também a análise dos resultados do controlo da compactação para ambos os materiais.

Através dos resultados destes ensaios, o solo foi classificado como uma areia bem graduada com silte (SW-SM) e pode concluir-se que, quando compactado e saturado, revela um comportamento muito bom. Este material deve ter um peso volúmico, aproximadamente, entre 1366 e 2213 kg/m³ (Fernandes, 2004). Obteve-se um valor de 2058 kg/m³ no ensaio do Proctor, o que valida a condição anterior.

Em ambos os materiais, solo e AGE, o equipamento compactador utilizado foi um cilindro de rolo liso, que é aconselhado para cascalho e terras saibrosas. O facto de se verificarem valores um pouco dispersos ao longo das medições, pode ser explicado pela seleção de um equipamento de compactação menos apropriado para o tipo de terreno e espessura das camadas executadas.

Em relação ao controlo da compactação realizado na obra, este foi realizado com recurso ao gamadensímetro, o qual mede o teor em água e a baridade húmida do terreno compactado. Os valores são posteriormente tratados em laboratório, relacionando o valor da baridade húmida com o valor do teor em água *in situ*, obtendo-se a baridade seca *in situ* e o grau de compactação. Este foi o único método para o controlo da compactação utilizado em obra, que, embora seja um método de ensaio de relativa facilidade de execução, apresenta alguns cuidados aquando da sua utilização, como a presença de radioatividade e os fatores naturais do terreno já referidos. Quanto às recomendações do Caderno de Encargos da EP para o controlo da qualidade dos aterros, é cumprido o número de ensaios e a sua frequência, ou seja um por escavação para os ensaios realizados no laboratório mencionados anteriormente.

7.1. Solo

Este material cumpre a especificação LNEC E 241: 1971. O documento refere as características que o material deve apresentar para poder ser utilizado num aterro, isto é, o solo é classificado como A-1 e não apresenta detritos orgânicos ou lixo. A especificação LNEC E 242: 1971 refere que o grau de compactação mínimo para um solo classificado como A-1 é 95%. Apesar de em algumas camadas existirem determinações pontuais com valores inferiores a 95%, como já foi referido na análise gráfica, os valores médios de cada uma é sempre igual ou superior ao valor mínimo referido. Em relação aos requisitos enumerados no Caderno de Encargos da EP, a percentagem máxima de material retido no peneiro de 19 mm da ASTM e a condição de, para um solo incoerente, o W estar entre $0,8 W_{otm} \leq W \leq 1,2 W_{otm}$, são verificados, apesar de pontualmente os valores medidos do W não pertencerem a este intervalo.

Alguns dos valores determinados *in situ* não correspondem aos valores referidos nas diferentes especificações apresentadas neste estudo. Vários fatores podem explicar isto, nomeadamente as condições de amostragem aquando da recolha da amostra de solo a ensaiar, uma vez que consiste numa amostra remexida algumas propriedades do solo vão-se alterar, não sendo os resultados laboratoriais reproduzidos com a exatidão das condições do terreno. Também a escolha do equipamento compactador pode influenciar os resultados finais.

Em algumas camadas, principalmente as n.º 14, 15 e à cota 322,90 m, verificam-se para os parâmetros medidos, valores de desvio padrão e coeficiente de variação reduzidos em relação às restantes. Isto pode dever-se ao número reduzido de ensaios realizados nestas camadas, uma vez que estas medidas são muito influenciadas por erros ou observações muito afastadas.

Quanto à variação do teor em água com a baridade seca, em algumas camadas denotam-se valores de baridade seca baixos e teor em água também baixo, esta situação pode dever-se a pequenas forças de natureza capilar desenvolvidas quando se verificam baixos níveis do teor em água, anulando-se quando este é nulo ou muito elevado (Cristelo, 2001).

Relativamente aos valores do grau de compactação, é possível através da análise da evolução deste com o teor em água, verificar que confirmam um grau de compactação superior a 95% recomendado pelas especificações apresentadas. Determinou-se, ainda, que a compactação foi realizada aplicando os teores em água do ramo seco da curva de compactação do ensaio Proctor, o que confere boa resistência ao solo, como já foi referido.

7.2. Agregado

Relativamente aos ensaios realizados no local de implantação da ETAR, a LCPC/SETRA recomenda que $\gamma_{d, \text{médio}}$ seja maior que 95 % do $\gamma_{d, \text{ótimo}}$, ou seja, os valores da baridade seca devem ser superiores a 1955 kg/m³. Após a análise, verificou-se que esta condição é cumprida. O desvio padrão e o coeficiente de variação apresentam valores mais elevados na camada mais profunda. Também nesta camada os valores do desvio padrão estão muito próximos dos valores médios dos teores em água, o que evidencia pequenos desvios nos valores medidos. Tal como no solo a compactação foi realizada segundo o ramo seco da curva de compactação.

Quanto aos ensaios realizados na via de acesso à ETAR, também se verifica a condição para a baridade seca mínima. Contrariamente, o desvio padrão e o coeficiente de variação apresentam valores mais elevados na camada mais superficial, apresentando valores do desvio padrão muito próximos dos valores médios dos teores em água, evidenciando pequenos desvios nos valores determinados. A compactação também foi determinada pela escolha de teores em água inferiores ao teor ótimo.

7.3. Trabalhos futuros

Considerando os objetivos deste trabalho, recomenda-se que em estudos futuros se proceda à:

- Realização de outros ensaios para o controlo da compactação, no sentido de obter correlações entre diferentes metodologias na determinação do grau de compactação;
- Aplicação de uma malha para a realização da campanha de ensaios *in situ*, de modo a simplificar a operação de controlo e maximizar a área de ensaios,
- Aplicação de novos métodos de compactação inteligente, como o equipamento de controlo contínuo da compactação.

Referências bibliográficas

Referências bibliográficas

- Army, H. D. (1997). Military Soils Engineering, FM 5-410. Washington, DC.
- Avalle, D. (2004). Impact Rolling in the Spectrum of Compaction Techniques and Equipment. Adelaide: Australian Geomechanics Society.
- Briaud, J., & Seo, J. (2003). Intelligent compaction: Overview and research needs. Texas A&M University.
- Caderno de Encargos da Estradas de Portugal. Fevereiro de 2009.
- Canelas, D. (2008). Metodologias no Controlo de Compactação em Aterros. Porto: ISEP (Tese de Mestrado).
- Caterpillar. Caterpillar Performance Handbook, Edition 29.
- Correia, A., & Brandl, H. (2001). Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Earth Structures. Netherlands: A. A. Balkema Publishers.
- Correia, A., 1980. Ensaios para o controlo de terraplenagens. Ministério da habitação e obras públicas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Cristelo, N., 2001. Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal. Universidade do Minho (Tese de Mestrado).
- Fernandes, M., 2004. Mecânica dos Solos. Vol. 1 (reimpressão de julho de 2004). Faculdade de Engenharia do Porto.
- González de Vallejo L.I., Ferrer M., Ortuño L. & Oteo C. [coords.], 2002. Ingeniería geológica. Prentice Hall, Madrid, 715 pp.
- LCPC/SETRA. (1992). Réalisation des remblais et des couche de forme, Fascicule II, Annexes Technique. França: LCPC/SETRA.
- Mendonça, A., (2012). Apontamentos teóricos da disciplina de reforço e contenção de terrenos. ISEP
- Mota-Engil, S.A. (2012). Manual de Acolhimento - Laboratório Central. Vila Nova de Gaia.
- Mota-Engil, SA & Águas do Centro, SA (2012). Desenvolvimento e especificação do PSS da ETAR de Castelo Branco.
- Mota-Engil, SA & MSÁGUAS DO CENTRO, SA (2012). Memória descritiva e justificativa do plano de trabalhos da empreitada de concepção / construção da ETAR de Castelo Branco.
- Neves, J., (1993). Estabilização de solos com cal. Estudo e aplicações rodoviárias. Secção Autónoma de Geotecnia Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. (Tese de Mestrado).
- Palha, C., (2008). Solos - Caracterização, classificação e utilização. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil.

Ribeiro, S., (2008). Terraplenagens. Metodologia e Técnicas de Compactação. Porto: FEUP (Tese de Mestrado).

Santos, J., (2008). Compactação - Elementos Teóricos. Lisboa: Instituto Superior Técnico (Tese de Mestrado).

Santos, P., 2009. Análise do Comportamento de um Aterro Construído com Material Evolutivo Compactado. Instituto Superior Técnico, Lisboa (Tese de Mestrado).

Society, N. Z. (2005). Field Description of Soil and Rock - Guideline for the Field Classification and Description of Soil and Rock for Engineering Purposes. New Zealand: NZGS.

Troxler Electronic Laboratories, I. (s.d.). Road Reader Nuclear Density Gauges, Models 3430 & 3440. USA.

Verdu, F., Martin, F., Salas, J., Gomez, O., Farias, G., & P.-Villamil, M. (1977). Compactacion de Terrenos - Terraplenes y Pedraplenes, Teoria y Prática. Barcelona, Espanha: Editores Técnicos Associados.

Normas e especificações

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials, 1967. T217 – Determination of moisture in soil by means of calcium carbide gas pressure moisture tester (*Speedy*).

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials, 1987. M145 – The Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes.

ASTM - American Society for Testing and Materials, 2008. D2167. Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Rubber Balloon Method.

ASTM - American Society for Testing and Materials, 2010. D6938. Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth).

ASTM - American Society for Testing and Materials, 2010. D7113 / D7113M. Standard Test Method for Density of Bituminous Paving Mixtures in Place by the Electromagnetic Surface Contact Methods.

ASTM - American Society for Testing and Materials, 2011. D2487. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).

IPQ – Instituto Português da Qualidade, 1965. NP 84. Solos. Teor em água.

IPQ – Instituto Português da Qualidade, 1969. NP 143. Solos. Limites de consistência.

IPQ – Instituto Português da Qualidade, 2012. NP EN ISSO 14001. Sistemas de gestão ambiental. Requisitos e linhas de orientação para a sua utilização.

IPQ – Instituto Português da Qualidade. NP EN ISO 9001:2008/AC: 2010. Sistemas de gestão da qualidade.

IPQ – Instituto Português da Qualidade. NP EN ISO/IEC 17025. Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração.

JAE – Junta Autónoma das Estradas, 1953. JAE P.6. Peso específico e absorção de água com inertes.

JAE – Junta Autónoma das Estradas, 1953. JAE S.8. Análise granulométrica com lavagem.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1962. E 1. Vocabulário de Estradas e Aeródromos.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1966. E 197. Solos. Ensaio de compactação.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1967. E 198. Solos. Determinação do CBR.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1967. E 199. Solos. Ensaio de equivalente de areia.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1967. E 201. Solos. Determinação do teor em matéria orgânica.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1967. E 204. Solos. Determinação da baridade seca *in situ* pelo método da garrafa de areia.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1967. E 205. Solos. Determinação da baridade seca *in situ* pelo método do volume de água deslocado.

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

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1971. E 241. Solos. Terraplenagens.

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1971. E 242. Solos. Execução de terraplenagens de estradas.

OHSAS - Occupational Health & Safety Advisory Services. OHSAS 18001. Health and Safety Management.

Links na Internet

<http://maquesonda.pt> (Consultado a 11 de julho de 2013)

http://netin.es.ipcb.pt/cp_patrimonio/index.htm(Consultado a 28 de junho de 2013)

<http://www.astm.org/Standards> (Consultado a 6 de agosto de 2013)

<http://www.cm-castelobranco.pt/index.php?link=mapaterritorial> (Consultado a 16 de julho de 2013)

<http://www.controls-group.com> (Consultado a 7 de agosto de 2013)

<http://www.huntraco.hu> (Consultado a 28 de junho de 2013)

<http://www.ice-holland.com/content/482/Technology/Vibroflots/> (Consultado a 8 de julho de 2013)

[http://www.infopedia.pt/\\$castelo-branco,2](http://www.infopedia.pt/$castelo-branco,2) (Consultado a 17 de julho de 2013)

http://www.intelligentcompaction.com/downloads/PapersReports/Texas_Briaud_IC%20Report_200409.pdf (Consultado a 6 de agosto de 2013)

<http://www.jupitermines.com> (Consultado a 28 de junho de 2013)

<http://www.matest.com/imgprodotti/S216KIT1.JPG> (Consultado a 11 de julho de 2013)

<http://www.menainfra.com/article/Polygonal-drum-for-deep-compaction/>(Consultado a 28 de junho de 2013)

http://www.menardbachy.com.au/dynamic_compaction.php (Consultado a 28 de junho de 2013)

<http://www.nationwideequipment.com> (Consultado a 28 de junho de 2013)

<http://www.troxlerlabs.com> (Consultado a 7 de agosto de 2013)

<http://www.uic.edu/classes/cemm/cemmlab/Experiment%207-Atterberg%20Limits.pdf>
(Consultado a 1 de agosto de 2013)

http://www.viamichelin.pt/web/Mapas-plantas/Mapa_planta-Castelo_Branco--Castelo_Branco-Portugal?strLocid=31NDF3ZmoxMGNNemt1T0RJek5UTT1jTFRjdU5Ea3IORE09 (Consultado a 16 de julho de 2013)

<http://www.volvoce.com> (Consultado a 28 de junho de 2013)

ANEXO I – Boletins dos ensaio de caracterização do solo A1162

ANEXO II – Boletins dos ensaio de caracterização do AGE

ANEXO III – Boletins dos ensaios do controlo da compactação do solo A1162

ANEXO IV – Boletins dos ensaios do controlo da compactação do AGE

