

Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Geológica

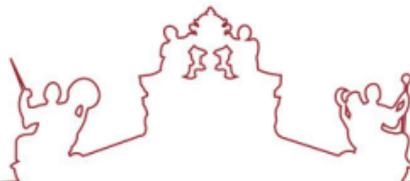
Dissertação

Contribuição para o estudo da variação da resistência de solos compactados em função do seu teor em água

Augusto Parauzibe Mazezo

Orientador(es) | Paula Alexandra Faria

Évora 2024



Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Geológica

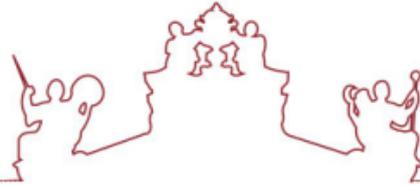
Dissertação

Contribuição para o estudo da variação da resistência de solos compactados em função do seu teor em água

Augusto Parauzibe Mazezo

Orientador(es) | Paula Alexandra Faria

Évora 2024



A dissertação foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia:

Presidente | António Bastos de Pinho (Universidade de Évora)

Vogais | Isabel Maria Ratola Duarte (Universidade de Évora) (Arguente)
Paula Alexandra Faria (Universidade de Évora) (Orientador)

Évora 2024



Esta página foi intensionalmente deixada em branco.

Dedicatória

Ao meu pai (em memória), à minha família e a todos quanto acreditam que sonhos, apesar dos desafios que impõem, são realizáveis.

Agradecimentos

Mais um passo é dado e mais uma vez pessoas distintas juntam-se a mim para esse feito. Poder exteriorizar o meu sentimento de gratidão por todo apoio prestado, quer direta ou indiretamente para que esta fase da minha vida se efetivasse, constitui um grande privilégio e satisfação. Por isso, meus agradecimentos sinceros:

À Deus-todo-poderoso, pelo dom da vida, pela sabedoria e sobretudo, pela sua assistência em todos os momentos sombrios e de incertezas que atravessei. Fez-me acreditar sempre de que ao continuar firme, seria capaz de alcançar o alvo.

À minha família que, apesar de estar distante, conseguiu imprimir sua presença e contribuição diversa, fez-me acreditar que eu era capaz de lutar contra qualquer desafio que pudesse determinar o meu fracasso durante a formação.

À Prof^a. Paula Faria, minha eterna orientadora, na verdade, mais que uma orientadora. Sua simpatia, seu profissionalismo e acima de tudo, abertura e entrega à investigação e à ciência, permitiram que fosse apresentado este trabalho. O ambiente por ela criado, permitiu-me aprender bastante sobre assuntos inerentes à pesquisa e transversais a esta, aprendizado este que constituirá num verdadeiro acervo para este meu tenro percurso académico e profissional.

Ao José Serrão por ter fornecido dados, bem como, por ter permitido que fossem utilizadas amostras existentes na litoteca do Departamento de Geociências para a realização deste estudo.

Ao Jorge, técnico do laboratório de mecânica de solos da Universidade de Évora pelo apoio, pela disponibilização atempada dos instrumentos, equipamentos, utensílios, etc., e sobretudo, pelas vezes que teve de efetuar leituras de alguns dos ensaios realizados quando, de alguma forma, estive impedido de o fazer.

À Prof^a. Isabel Duarte e aos professores do mestrado em Engenharia Geológica da Universidade de Évora por cada apoio prestado durante a formação para que o meu aprendizado fosse, efetivamente, pleno.

A todos amigos e colegas que ganhei, tanto fora como dentro do ambiente académico, cuja companhia permitiu tornar esta jornada muito menos pesada.

Esta página foi intensionalmente deixada em branco.

Resumo

O presente estudo teve como objetivo estabelecer a influência que o teor água na compactação tem na resistência mecânica de solos. Seis amostras de solos arenosos foram submetidas aos ensaios de identificação (análise granulométrica e limites de consistência), ensaios de compactação do tipo Proctor e ensaios de compressão simples, punçoamento à semelhança do ensaio CBR e de corte direto. Procurou-se assim compreender de que forma varia a capacidade resistente dos solos analisados, em função do tipo de solicitação que lhe é imposto, quando compactado com diferentes teores em água.

O tratamento dos resultados dos ensaios executados, sugerem que as curvas de tendência da variação da resistência em função do grau de humedecimento dos solos aquando da sua compactação, não se desenvolve do mesmo modo em todos os tipos de solicitação estudados.

Palavras-chave:

Mecânica dos solos; Resistência; Aterros; Teor em água; Geotecnia.

Abstract

Contribution to the study of the compacted soil strength variation as a water content function

Study aimed to establish the influence that water content in compaction has on the mechanical strength of soils. Six samples of sandy soils were subjected to identification tests (particle size analyses and consistency limits), Modified Proctor compaction tests, and uniaxial compression tests, pushing tests similar to the CBR test, and direct shear test. Thus, it was sought to understand how the resistant capacity of the analyzed soils varies, depending on the type of request imposed on it, when compacted with different water contents. The treatment of the results of the tests carried out suggests that the trend curves of the variation of strength as a function of the degree of moistening of the soils at the time of their compaction, do not develop in the same way in all types of stresses studied.

Keywords:

Soil mechanics; strength; Landfills; Water content; Geotechnics.

Esta página foi intensionalmente deixada em branco.

ÍNDICE

Dedicatória.....	v
Agradecimentos	vi
Resumo	viii
Abstract.....	ix
Índice de figuras.....	xv
Índice de tabelas.....	xx
Simbologia	xxi
Abreviaturas.....	xxi
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	23
CAPÍTULO 2: COMPACTAÇÃO DE SOLOS.....	26
2.1. Solos.....	26
2.2. Compactação de solos.....	27
2.2.1. Fatores que influenciam a compactação	28
2.2.1.1. Teor em água	28
2.2.1.2. Energia de compactação	30
2.2.1.3. Tipo de solo.....	31
2.3. Comportamento mecânico de solos compactados (efeito da água)	33
2.3.1. Resistência à compressão simples	34
2.3.2. Resistência à penetração	36
2.3.3. Resistência ao corte.....	37
2.3.4. Teor em água ótimo de compactação	38
CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1. Amostragem	40
3.2. Preparação geral das amostras	42
3.2.1. Materiais e instrumentos	42
3.2.2. Procedimento	42

3.2.2.1. Secagem e desagregação dos torrões	42
3.2.2.2. Redução da amostra	43
3.3. Realização dos ensaios.....	45
3.3.1. Determinação do teor em água	45
3.3.1.1. Materiais e instrumentos	45
3.3.1.2. Procedimento	46
3.3.1.3. Cálculos.....	46
3.3.2. Análise granulométrica	47
3.3.2.1. Materiais e instrumentos	47
3.3.2.2. Procedimento	47
3.3.2.3. Cálculos.....	49
3.3.3. Limites de consistência	50
3.3.3.1. Limite de liquidez	50
3.3.3.1.1. Materiais e instrumentos	50
3.3.3.1.2. Procedimento	51
3.3.3.1.3. Cálculos.....	51
3.3.3.2. Limite de plasticidade	52
3.3.3.2.1. Materiais e instrumentos	52
3.3.3.2.2. Procedimento	52
3.3.3.2.3. Cálculos.....	53
3.3.4. Ensaio de compactação	53
3.3.4.1. Materiais e instrumentos	54
3.3.4.2. Procedimento	56
3.3.4.3. Cálculos.....	61
3.3.5. Ensaio de resistência à compressão	62
3.3.5.1. Materiais e instrumentos	62
3.3.5.2. Procedimento	63

3.3.5.3. Cálculos.....	64
3.3.6. Ensaio de resistência ao punçoamento.....	65
3.3.6.1. Materiais e instrumentos.....	65
3.3.6.2. Procedimento.....	65
3.3.6.3. Cálculos.....	67
3.3.7. Ensaio de resistência ao corte direto.....	67
3.3.7.1. Materiais.....	68
3.3.7.2. Procedimento.....	69
3.3.6.3. Projeção de dados obtidos.....	71
CAPÍTULO 4: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	72
4.1. Teor em água no estado natural.....	72
4.2. Ensaio de identificação e classificação de amostras.....	73
4.2.1. Análise granulométrica.....	73
4.2.2. Limites de consistência ou Atterberg.....	76
4.2.3. Classificação para fins de engenharia.....	79
4.3. Ensaio de Compactação Proctor.....	80
4.4. Resistência versus teor em água.....	82
4.4.1. Compressão uniaxial (simples).....	83
4.4.2. Punçoamento.....	89
4.4.2.1. Recuperação de solos após penetração.....	99
4.4.3. Corte direto.....	104
4.4.3.1.1. Ângulo de atrito (ϕ).....	107
4.4.3.1.1.1. Ângulo de atrito (resistência de pico).....	107
4.4.3.1.1.2. Ângulo de atrito (resistência residual).....	112
4.4.3.1.1.3. Análise geral do ângulo de atrito.....	118
4.4.3.1.2. Coesão (c).....	118
4.4.3.1.2.1. Coesão (resistência de pico).....	118

4.4.3.1.2.2. Coesão (resistência residual).....	124
4.4.3.1.2.3. Análise geral da coesão.....	129
4.4.3.1.3. Tensão de corte versus teor em água	130
4.4.3.1.3.1. Resistência ao corte (de pico)	130
4.4.3.1.3.2. Resistência ao corte residual	135
4.4.3.1.3.3. Análise geral da resistência ao corte	140
CAPÍTULO 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	141
6. Referências bibliográficas.....	143

Índice de figuras

Figura 1. Curva de compactação (Santos, 2008 Cit. por Maia, 2013).....	29
Figura 2. Curvas de compactação mediante o incremento da energia específica aplicada (Silva, 2016).....	30
Figura 3. Curvas de compactação em função do tipo de solo (adaptado de Fernandes, 2004 Cit. por Silva, 2013).....	32
Figura 4. Efeito da compactação na resistência de solos argilosos (Pereira, 2005 Cit. por Faria, 2007).....	34
Figura 5. Diferentes estudos relacionando os resultados do efeito do teor em água na resistência à compressão simples de solos tratados com cimento (Couto, 2018).....	35
Figura 6. Resistência à penetração versus teor em água (adaptado de Caputo, 1988).....	36
Figura 7. Teores em água aceitáveis para a compactação de solos (Budhu, 2010).....	39
Figura 8. Características visuais do conjunto das amostras A.....	41
Figura 9. Características visuais do conjunto das amostras Z.....	42
Figura 10. Preparação de amostras: a-receção das amostras; b – espalhamento de amostra; c-secagem; d-desagregação dos torrões.....	43
Figura 11. Preparação de amostras: a) redução da amostra; b) pesagem; c) conservação das subamostras.....	44
Figura 12. Esquema de repartição de amostras para provetes destinados à compactação Proctor.....	44
Figura 13. Esquema de repartição de amostras usado para obtenção de provetes destinados para os ensaios de identificação.....	45
Figura 14. Determinação do teor em humidade: a) – pesagem do copo; b) – copo identificado e com massa registada; c) – estufa; d) – exsiccador; e) – provetes depois de secos e anotadas todas as massas.....	46
Figura 15. Peneiração de solos por via húmida.....	48
Figura 16. Material retido em cada peneiro.....	49
Figura 17. Determinação do limite de liquidez: a) – materiais necessários e b) – execução do ensaio.....	51
Figura 18. Determinação do limite de plasticidade: a) – materiais necessários e b) – execução do ensaio.....	53
Figura 19. Compactador mecânico.....	55
Figura 20. Conjunto molde montado para o ensaio: a) longa; b) molde; c) base.....	55
Figura 21. Determinação do volume do molde.....	56

Figura 22. Marcação do tabuleiro	57
Figura 23. Humedecimento de provetes: a) medição da água a adicionar; b) provete previamente colocado no tabuleiro e pronto a humedecer; c) humedecimento de provete	57
Figura 24. Homogeneização e divisão do provete: a) homogeneização; b) provete homogeneizado; c) provete dividido em cinco porções, aproximadamente, iguais	58
Figura 25. Transferência e compactação da primeira parte: a) transferência do tabuleiro maior para o de menor; b) transferência do tabuleiro menor para o molde; c) molde preso à base do compactador	59
Figura 26. Compactação das restantes quatro partes do provete	59
Figura 27. Rasuramento do provete: a) transferência do molde com provete compactado; b) remoção da longa; c) processo de rasar o provete	60
Figura 28. Pesagem do molde contendo o provete	60
Figura 29. Extração de um provete após compactação	61
Figura 30. Toma de porções do provete para a determinação do teor em água	61
Figura 31. Prensa usada para o carregamento dos provetes	63
Figura 32. Ensaio de resistência à compressão uniaxial: a) colocação de provete sobre o prato; b) dados apresentados durante o carregamento	64
Figura 33. Tipo de rotura observado durante as compressões: a) – provete antes da remoção da massa que realça as fissuras externas criadas durante a compressão; b) – provete após remover a massa de solo solta, exterior à superfície de rotura	64
Figura 34. Prensa de CBR da ELE International	66
Figura 35. Execução do ensaio de determinação da resistência ao punçoamento: a) – Montagem do ensaio e carregamento de provete; b) – provete extraído após o carregamento	66
Figura 36. Extração e recolha de porções do provete para a determinação do teor em água ..	67
Figura 37. Máquina de corte direto	68
Figura 38. Cravação do amostrador e remoção do provete para o ensaio de corte: a) amostrador sobre o provete; b) placa metálica sobre o amostrador; c) cravação do amostrador; d) amostrador cravado	69
Figura 39. Transferência do provete, do amostrador para a caixa de corte: a) provete rasoiado; b) caixa de corte com o provete	70
Figura 40. Realização do ensaio de corte	70
Figura 41. Determinação da coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ): T – resistência ao cisalhamento; δ – tensão de corte; σ – tensão normal (adaptado de Caputo, 1988)	71
Figura 42. Curvas granulométricas das amostras A1, A2 e A3	74

Figura 43. Curvas granulométricas das amostras Z1, Z2 e Z3 (excerto de Serrão, 2018).....	76
Figura 44. Gráfico exemplo usado para determinação do valor do LL por interpolação da amostra A1	77
Figura 45. Curva de compactação: teor em água versus baridade máxima teórica da amostra A3.....	81
Figura 46. Projeção de resultados da compressão uniaxial de provetes da amostra A1	84
Figura 47. Projeção de resultados da compressão uniaxial de provetes da amostra A2	85
Figura 48. Projeção de resultados da compressão uniaxial de provetes da amostra A3	86
Figura 49. Imagem de um provete de uma das amostras do conjunto Z destruído após o início do carregamento.....	88
Figura 50. Condições de uma das amostras do conjunto A após carregamento	89
Figura 51. Definição durante o ensaio, do momento de rotura em detrimento das outras roturas secundárias.....	89
Figura 52. Resultados dos ensaios de punçoamento da amostra A1	91
Figura 53. Resultados dos ensaios de punçoamento da amostra A2.....	92
Figura 54. Momentos registados do escape da água do molde.....	94
Figura 55. Resultados dos ensaios de punçoamento da amostra A3.....	95
Figura 56. Resultados dos ensaios de punçoamento da amostra Z1	96
Figura 57. Condição de um provete após atingir resistência máxima	97
Figura 58. Resultados dos ensaios de punçoamento da amostra Z2	97
Figura 59. Resultados dos ensaios de punçoamento da amostra Z3	98
Figura 60. Resultados da recuperação de solos após penetração da A1	101
Figura 61. Resultados da recuperação de solos após penetração da A2	102
Figura 62. Resultados da recuperação de solos após penetração da A3	103
Figura 63. Resultados de corte da amostra A1	105
Figura 64. Determinação da coesão e ângulo de atrito da amostra A1 (proвете compactado com $\sim W_{\text{ópt}}$).....	106
Figura 65. Determinação da coesão e ângulo de atrito (residual) da amostra A1 (proвете compactado com $\sim W_{\text{ópt}}$).....	106
Figura 66. Variação do valor do ângulo de atrito em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A1	107
Figura 67. Variação do valor do ângulo de atrito em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A2	108

Figura 68. Variação do valor do ângulo de atrito em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A3	109
Figura 69. Variação do valor do ângulo de atrito em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z1. Dados coligidos (Serrão, 2018)	110
Figura 70. Variação do valor do ângulo de atrito em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z2. Dados coligidos (Serrão, 2018)	111
Figura 71. Variação do valor do ângulo de atrito em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z3. Dados coligidos (Serrão, 2018)	112
Figura 72. Variação do valor do ângulo de atrito residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A1	113
Figura 73. Variação do valor do ângulo de atrito residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A2	114
Figura 74. Variação do valor do ângulo de atrito residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A3	115
Figura 75. Variação do valor do ângulo de atrito residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z1. Dados coligidos (Serrão, 2018)	116
Figura 76. Variação do valor do ângulo de atrito residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z2. Dados coligidos (Serrão, 2018)	116
Figura 77. Variação do valor do ângulo de atrito residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z3. Dados coligidos (Serrão, 2018)	117
Figura 78. Variação do valor da coesão em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A1	119
Figura 79. Variação do valor da coesão em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A2	120
Figura 80. Variação do valor da coesão em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A3	121
Figura 81. Variação do valor da coesão em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z1. Dados coligidos (Serrão, 2018)	122
Figura 82. Variação do valor da coesão em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z2. Dados coligidos (Serrão, 2018)	123
Figura 83. Variação do valor da coesão em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z3. Dados coligidos (Serrão, 2018)	124
Figura 84. Variação do valor da coesão residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A1	124

Figura 85. Variação do valor da coesão residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A2	125
Figura 86. Variação do valor da coesão residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A3	126
Figura 87. Variação do valor da coesão residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z1. Dados coligidos (Serrão, 2018)	127
Figura 88. Variação do valor da coesão residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z2. Dados coligidos (Serrão, 2018)	128
Figura 89. Variação do valor da coesão residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z3. Dados coligidos (Serrão, 2018)	129
Figura 90. Variação do valor da resistência ao corte em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A1	131
Figura 91. Variação do valor da resistência ao corte em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A2	132
Figura 92. Variação do valor da resistência ao corte em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A3	132
Figura 93. Variação do valor da resistência ao corte em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z1. Dados coligidos (Serrão, 2018)	133
Figura 94. Variação do valor da resistência ao corte em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z2. Dados coligidos (Serrão, 2018)	134
Figura 95. Variação do valor da resistência ao corte em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z3. Dados coligidos (Serrão, 2018)	135
Figura 96. Variação do valor da resistência ao corte residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A1	136
Figura 97. Variação do valor da resistência ao corte residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A2	137
Figura 98. Variação do valor da resistência ao corte residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A3	137
Figura 99. Variação do valor da resistência ao corte residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z1. Dados coligidos (Serrão, 2018)	138
Figura 100. Variação do valor da resistência ao corte residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z2. Dados coligidos (Serrão, 2018)	139
Figura 101. Variação do valor da resistência ao corte residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z3. Dados coligidos (Serrão, 2018)	140

Índice de tabelas

Tabela 1. Valores médios da baridade seca e o teor em água ótimo (Trindade et al., 2003) ..	32
Tabela 2. Teor em água no estado natural médio, do conjunto de amostras A	72
Tabela 3. Teor em água no estado natural médio, do conjunto de amostras Z (Serrão, 2018)	73
Tabela 4. Resultados da peneiração da amostra A1	73
Tabela 5. Resultados da peneiração da amostra A2	74
Tabela 6. Resultados da peneiração da amostra A3	74
Tabela 7. Quadro resumo da determinação dos limites de consistência	77
Tabela 8. Classificação das amostras (conjunto de amostras A e Z) segundo proposta de Jenkins (1988) Cit. por Serrão (2018).....	78
Tabela 9. Classificação das amostras A1, A2 e A3 segundo 3 sistemas de classificação	79
Tabela 10. Classificação das amostras Z1, Z2 e Z3 segundo 3 sistemas de classificação (excerto de Serrão, 2018).....	80
Tabela 11. Resultados da compactação Proctor, para as amostras A	81
Tabela 12. Resultados da compactação Proctor para as amostras Z. Dados coligidos (Serrão, 2018).....	81
Tabela 13. Resultados parciais do punçoamento da A1	91
Tabela 14. Resultados parciais do punçoamento da amostra A2	92
Tabela 15. Resultados parciais do punçoamento da amostra A3	95
Tabela 16. Resultados parciais do punçoamento da amostra Z1.....	96
Tabela 17. Resultados parciais do punçoamento da amostra Z2.....	98
Tabela 18. Resultados parciais do punçoamento da amostra Z3.....	99

Simbologia

c – Coesão

IP – Índice de plasticidade

LL – Limite de liquidez

LP – Limite de plasticidade

ϕ - Ângulo de atrito

t – Tempo

W – Teor em água

$W_{\text{ópt}}$ – Teor em água ótimo

γ – Baridade

$\gamma_{s \text{ máx}}$ – Baridade seca máxima

γ_w – *Baridade húmida do solo*

σ – Tensão normal

τ – Resistência ao corte

Abreviaturas

A – Autoestrada

ASTM – “American Association for Testing and Materials”

CBR – “California Bearing Ration”

DRX – Difração por raio-X

GTR – “*Guide des Travaux Routiers*”

IP – Itinerário Principal

LCPC – “Laboratoire Central des Ponts et Chaussées”

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NF – Norma Francesa

NP – Norma Portuguesa

SETRA – “(Service d’ Etudes Techniques des Routes et Autoroutes)”

SUCS – “Soil Unified Classification System”

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1. Introdução

O correto dimensionamento, conceção e execução, e conseqüente exploração de qualquer obra de engenharia, está intrinsecamente ligada à correta condução dos estudos geológico-geotécnicos *in situ* e laboratoriais, que visam, essencialmente, conhecer as características geotécnicas dos materiais, por um lado, como substratos (terrenos) sobre os quais as obras são construídas, e por outro lado, como materiais empregues na construção dessas mesmas obras, total ou parcialmente.

Segundo Prates (2018), em obras lineares (seja rodoviária, ferroviária ou outra), a conceção dos aterros requer uma utilização criteriosa dos materiais, solos ou rochas provenientes das escavações, quer escavados na linha do traçado ou em áreas de empréstimos. Dependendo da natureza (exigência) do projeto, e tratando-se dos geomateriais destinados para a construção, o conhecimento das suas características geotécnicas orienta a sua gestão com otimização da sua reutilização na construção. De acordo com Correia et al., (2021); Prates (2018); Cordeiro & Zampieri (2018) os materiais existentes nas zonas a escavar são reutilizados, rejeitados ou melhorados, em função das suas características intrínsecas, nomeadamente as suas características físicas e mecânicas.

Em obras de terra (aterros) a validação da compactação das camadas de aterro, obriga a que o grau de compactação dessas camadas, bem como o teor em água dos solos que a compõem se enquadrem nas definições do caderno de encargos existente nessa obra. No que respeita ao teor em água admitido, normalmente ele pode variar de $\pm 2\%$, ou $\pm 1\%$, relativamente ao teor ótimo de compactação do solo.

Os trabalhos de investigação levados a cabo no âmbito desta dissertação, pretendem ser um contributo para o conhecimento do comportamento mecânico de solos compactados, em particular no que se refere à forma como variam a resistência à compressão uniaxial, ao punçoamento e ao cisalhamento, em função da variação do teor em água de compactação.

Neste sentido foram colhidas 3 amostras de solos identificadas com a letra A, usados na construção do subtroço Évora Norte – Freixo, da nova ligação ferroviária entre Évora Norte e Elvas / Caia, bem como 3 amostras de solos usados na construção do troço que se inicia na

interceção do IP1/A2 (Grândola) com direção a Figueira dos Cavaleiros, identificadas com a letra Z, arquivadas na litoteca do Departamento de Geociências da Universidade de Évora, parcialmente estudadas por um anterior aluno do mestrado de Engenharia geológica, José Serrão.

Os dados apresentados neste trabalho foram obtidos por ensaios realizados pelo autor, em todas as amostras do conjunto A.

No caso das amostras do conjunto Z, os dados apresentados resultam, quer da realização dos ensaios pelo autor, quer a partir da compilação dos dados obtidos por José Serrão conforme referido anteriormente.

Assim, para além de caracterizar os solos, pela realização dos ensaios de determinação do teor em água natural, os ensaios de identificação (análise granulométrica e limites de consistência) procedeu-se ainda à realização do ensaio de compactação, para determinar o teor em água ótimo de compactação de cada solo, ao qual corresponde a sua baridade máxima teórica. Com o conhecimento do valor do teor em água ótimo de compactação de cada solo, foi então possível preparar provetes para com eles avaliar como varia cada um dos 3 tipos de resistência em função do humedecimento do solo aquando da sua compactação.

Depois de compactados provetes dos diversos solos em estudo, com diferentes teores em água, procurou-se estabelecer a influência que o teor em água que o solo possui no momento da compactação, tem na sua resistência mecânica quando sujeito a diferentes solicitações: à compressão uniaxial, punçoamento e cisalhamento.

1.2. Estrutura do trabalho

O presente trabalho é composto por cinco capítulos, dispostos sequencialmente da seguinte forma:

No **capítulo 1 – Introdução**, preparar o leitor sobre a natureza dos assuntos que são aqui tratados e que vai encontrar à medida que vai explorar este trabalho.

No **capítulo 2 – Compactação de solos**, apresentam-se os conceitos inerentes à compactação de solos, sobretudo ao papel que o teor em água desempenha nessa compactação e a resistência mecânica dos solos após compactação.

No **capítulo 3 – Materiais e métodos**, procede-se à descrição dos materiais estudados, que correspondem a seis amostras de solos, bem como à descrição das metodologias usadas na concretização do trabalho experimental, fazendo referência às especificações e normas consideradas.

No **capítulo 4 – Apresentação e discussão de resultados**, apresentam-se os resultados obtidos e sua respetiva discussão, incluindo, quando possível, fundamentação necessária para qualquer posicionamento tomado sobre o seu significado, quer prático, quer teórico.

No **capítulo 5 – Considerações finais**, apresentam-se algumas das mais relevantes considerações sobre os resultados e discussão apresentada.

CAPÍTULO 2: COMPACTAÇÃO DE SOLOS

A compactação é uma das técnicas de melhoramento de solos mais utilizada em todo o mundo na engenharia civil, sobretudo em obras de terra. Neste capítulo, apresenta-se informação relativa à compactação de solos, nomeadamente no que concerne aos estudos realizados em laboratório, atividade primordial que antecede os trabalhos de compactação no campo.

Sem a pretensão de ser exaustivo, pretende-se apresentar resumidamente os conceitos e pressupostos em torno da compactação de solos, sobretudo os fatores que influenciam a sua compactação, com particular interesse no teor em água de compactação, bem como a alteração nas características geotécnicas que se pode esperar nos solos, em resultado da compactação.

2.1. Solos

O solo é um material natural polifásico, constituído por três fases: fase sólida, líquida e gasosa. A fase sólida é constituída pelas partículas (ou grãos) de rocha ou que podem exibir uma gama variada de tamanhos e formas. As fases líquida e gasosa, correspondem ao preenchimento dos espaços vazios deixados pelo arranjo das partículas constituintes da fase sólida, respetivamente, por água e por ar.

A definição do termo solo varia muito com a área em que o mesmo é empregue, em função da utilidade ou finalidade a que se destina. O vocabulário de Estradas e Aeródromos (LNEC) refere-se ao solo como sendo o “conjunto natural de partículas minerais que podem ser separadas por agitação na água; os vazios entre as partículas contêm água e ar, separada ou conjuntamente” (Fernandes, 1994 Cit. por Maia, 2013).

Em obras de engenharia civil, sobretudo, em obras que envolvem a construção de aterros, como é o caso das obras lineares e de que são exemplo as obras rodoviárias, muitos problemas podem decorrer de uma incorreta aplicação dos solos na execução das camadas que compõem os aterros. Exemplo disso é o caso da execução dos aterros em estradas, sem a adequada compactação das camadas que o constituem, situação que permite o desenvolvimento de anomalias, como é o caso da deformação superficial que leva ao estabelecimento de danos no pavimento, ou ao surgimento de problemas de estabilidade de taludes.

Os solos utilizados nos aterros são remexidos e soltos, provenientes da escavação na linha do traçado ou na área de empréstimo. Por conseguinte, as suas características, no estado em que se encontram após escavação, não permitem capacidade resistente e de suporte para fazer face às solicitações que lhe serão impostas, sendo, por isso, necessário submetê-los a um tratamento mecânico, por via da sua compactação, que conduzirá ao aumento das suas capacidades resistentes, para permitir o cumprimento dos requisitos exigidos.

Conforme considera Multiquip.Basic (2004) Cit. por Maia (2013) “caso a compactação seja executada indevidamente, pode dar margem a uma acomodação do solo e causar custos de manutenção desnecessários ou mesmo a perda da estrutura em causa”, situação esta que se evita conhecendo-se os diferentes fatores que interferem na compactação de solos como é detalhado a seguir.

2.2. Compactação de solos

A “compactação, no geral, é a densificação do solo pela remoção do ar, que requer energia mecânica” (Das, 2010). Trindade et al., (2003) definem a compactação de solos como “ação mecânica por meio da qual se impõe ao solo uma redução de seu índice de vazios”. é um processo que “origina a redução de volume de um solo sem variação do seu teor em água ou massa, sendo um processo que essencialmente altera a estrutura do solo” (Crispim et al., 2011 Cit. por Maia, 2013). Com a compactação, o solo natural transforma-se em um material mais denso.

De acordo com Caputo (1988) “a compactação de um solo visa melhorar suas características, não só quanto à resistência, mas, também, nos aspetos: permeabilidade, compressibilidade e absorção d’água”.

Nesta perspetiva, os benefícios da compactação, de acordo com Murthy (2002), traduzem-se nos seguintes aspetos:

- a) Aumento da resistência do solo.
- b) Maior capacidade de carga.
- c) Redução do assentamento (menor compressibilidade).
- d) Redução da vazão de água (infiltração de água).
- e) Redução do inchaço (expansão) e colapso (contração) do solo.

f) Maior estabilidade do solo.

Assim, no entender de Murthy, a compactação inadequada pode levar a:

- a) Dificuldades estruturais decorrentes de assentamentos totais e diferenciais excessivos.
- b) Rachaduras em pavimentos, pisos e porões.
- c) Erosão do solo.

2.2.1. Fatores que influenciam a compactação

De acordo com Crispim (2007), o engenheiro Ralph R. Proctor, na década de 1930, cujo nome foi atribuído ao ensaio de compactação (ensaio Proctor)¹, publicou nos Estados Unidos da América, suas observações sobre a compactação de aterros de solos. Proctor constatou que ao aplicar um certo número de golpes de um pilão sobre o solo contido num molde, em laboratório, havia uma relação intrínseca entre a baridade máxima seca teórica e o teor em água de compactação, tendo por isso chegado a uma importante conclusão de que a baridade depende essencialmente do teor em água de compactação.

O aumento da baridade (peso volúmico seco) de um solo, resultante da compactação, depende principalmente da energia despendida e do teor em água do solo. Segundo Moreira (2008) Cit. por Silva (2016), os fatores que influenciam a compactação de solos são: a água; a energia de compactação e a granulometria do solo ou melhor, de acordo com os autores Das (2010) e Maia (2013), o tipo de solo. Assim, são fatores que mais influenciam a compactação e que merecerão atenção neste trabalho: o teor em água; a energia de compactação e o tipo de solo.

2.2.1.1. Teor em água

A constatação feita por Proctor resultou no que se designa hoje por curva de compactação que resulta da relação de duas variáveis, uma, no eixo das abcissas (teor em água) e outra, no eixo das ordenadas (baridade seca). Proctor (1930) Cit. por Trindade et al., (2003) observou que quando se compacta um solo com humidade mais baixa, o atrito entre as partículas é muito alto e não se consegue uma significativa redução dos vazios. Para teores em água mais elevados, a água provoca um certo efeito de lubrificação entre as partículas sólidas constituintes do solo, fazendo com quem estas deslizem entre si, configurando-se num arranjo mais compacto. A

¹ Ensaio de compactação Proctor.

partir de um certo teor em água a compactação não consegue mais expulsar o ar dos vazios, onde o grau de saturação é elevado e o ar é envolto por água, resultando na redução da baridade (peso específico aparente ou massa volúmica), pois o aumento do valor da baridade seca corresponde à eliminação do ar destes mesmos vazios. Assim, chegou à conclusão de que para cada solo e para um determinado nível de energia, há um valor do teor em água, designado teor em água ótimo (W_{opt}), que conduz à obtenção de um valor de baridade seca máxima ($\gamma_s^{\text{máx}}$) como ilustra a figura 1 a seguir. O ramo ascendente da curva é denominado ramo seco e o descendente por ramo húmido.

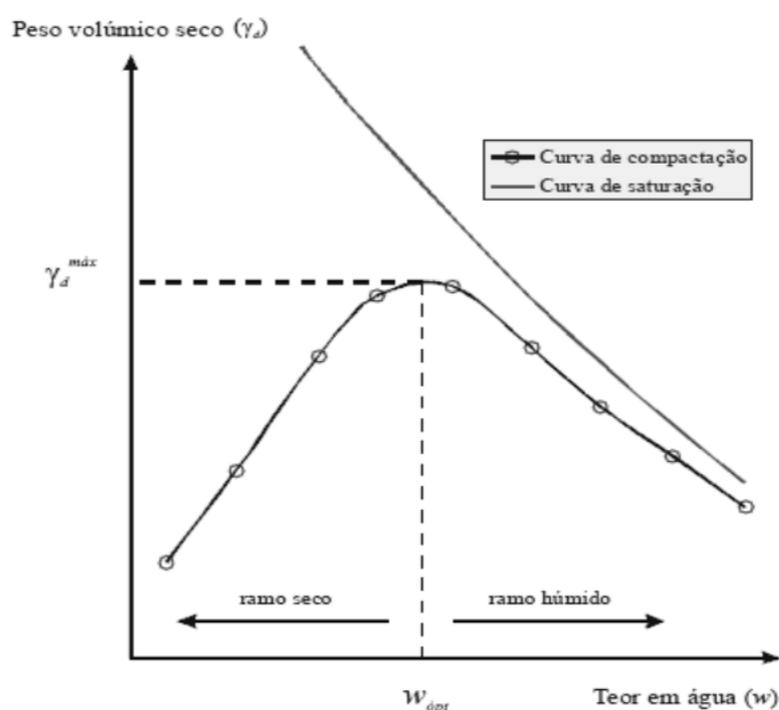


Figura 1. Curva de compactação (Santos, 2008 Cit. por Maia, 2013)

No ramo seco, enquanto o aumento a água atua na lubrificação e reduz o elevado atrito entre as partículas, incrementando, deste modo, o valor da baridade, no ramo húmido, o aumento do teor em água leva a uma diminuição do valor da baridade.

Uma explicação dada para este facto é a seguinte: “verifica-se uma ineficácia da expulsão do ar dos vazios do solo porque a carga transmitida ao solo durante o processo de compactação é absorvida pela sua fase líquida, isto é, a água” (Moreira, 2008 Cit. por Silva, 2016).

2.2.1.2. Energia de compactação

O resultado da compactação pode ser analisado do ponto de vista do teor em água de compactação como explicado anteriormente, mas também, do ponto de vista da energia aplicada na compactação. A redução do ar dos vazios e consequentemente, o aumento da baridade seca (peso volúmico seco), pode ser conseguida mediante o incremento da energia de compactação (figura 2).

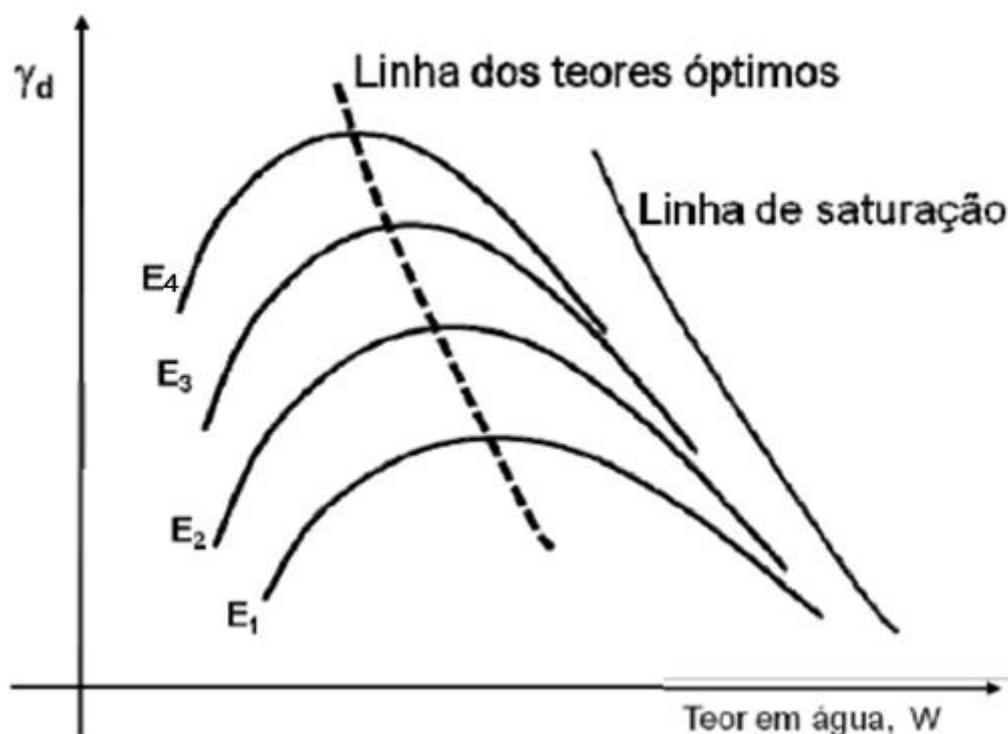


Figura 2. Curvas de compactação mediante o incremento da energia específica aplicada (Silva, 2016)

Da figura 2 acima, constata-se que o aumento da energia de compactação ($E_1 - E_4$) conduz ao aumento do valor da baridade seca máxima teórica (linha a tracejado), e ao mesmo tempo com a redução do teor em água de compactação que se evidencia com um ligeiro deslocamento das baridades máximas teóricas para a esquerda. Outra observação que se pode fazer desta experiência é que para “um dado tipo de compactação existe um limiar do grau de saturação que não é possível ultrapassar” (Moreira, 2008 Cit. por Silva, 2016).

Dito de outro modo, para um mesmo solo a compactação com a aplicação de diferentes energias, conduz à definição de curvas de compactação com desenho idêntico mas cujo

posicionamento no gráfico de Baridade versus teor em água, e em função do aumento da energia de compactação, se define por se situarem sucessivamente acima e à esquerda umas das outras, isto é, a curva resultante da compactação com menor energia fica mais baixa (menor valor de baridade máxima teórica) e mais à direita (maior valor de teor ótimo) que as demais, as quais vão ficando acima desta (maior valor de baridade máxima) e à esquerda (menor valor do teor ótimo), sendo a curva posicionada mais à esquerda e mais acima a que corresponde ao maior valor de energia de compactação. Contudo observa-se que a parte final do ramo húmido de todas elas tende a sobrepor-se, definindo uma linha próxima à referida linha de saturação do solo (que corresponde a 100% de saturação).

2.2.1.3. Tipo de solo

Para além dos fatores descritos acima, importa ter também em conta a influência das diferentes propriedades intrínsecas que cada tipo de solo possui. Como consideram os autores Faria (2005), Das (2010), Silva (2013), entre outros, características como o tamanho, a forma, a densidade das partículas, bem como, a quantidade e o tipo de minerais de argila desempenham um papel importantíssimo nos resultados da compactação, isto é, na baridade seca teórica máxima e respetivo teor em água ótimo, como se pode ver na figura 3 e tabela 1 a baixos.

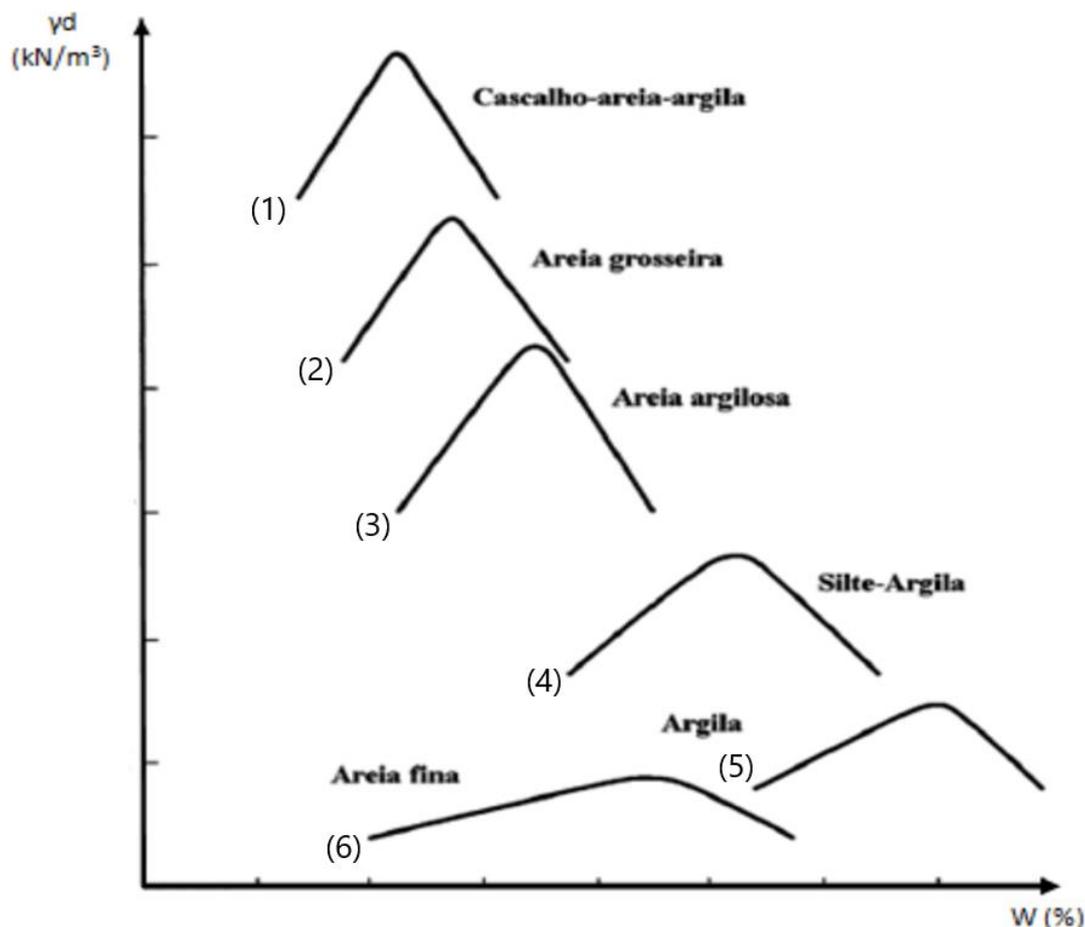


Figura 3. Curvas de compactação em função do tipo de solo (adaptado de Fernandes, 2004 Cit. por Silva, 2013)

Pela figura 3 acima, figura que ilustra a forma e a posição das curvas e pela tabela 1 abaixo, quadro resumo proposto pelos autores Trindade et al., (2003) com os valores médios das baridades secas máximas e respectivos valores dos teores em água ótimo, tiram-se algumas notas que evidenciam o papel da tipologia dos solos tem nos resultados da compactação.

Tabela 1. Valores médios da baridade seca e o teor em água ótimo (Trindade et al., 2003)

Granulometria	W_{ot} (%)	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m^3) médios
Areias	7 a 12	20
Siltes	18 a 25	16
Argilas	30 a 40	13

No geral, para mesma energia de compactação, os solos com maior percentagem de finos tendem a apresentar valores mais baixos da baridade máxima seca quando comparados os solos grosseiros, cujos valores são tendencialmente mais elevados. Os valores do teor em água ótimo

de compactação tendem a ser mais elevados para os solos argilosos enquanto para os solos arenosos tendem a ser mais baixos.

De acordo com Moreira (2008) Cit. por Silva (2016) a curva de compactação de solos com quantidades de areia consideráveis que exibem índices de plasticidade baixos, baridades máximas secas superiores e valores para o teor em água em água ótimo, reduzidos, tendem a ser mais fechadas. Ainda de acordo com este autor, a forma das curvas depende do índice de plasticidade, isto porque a gama de teores em água mede a diferença entre os limites de plasticidade e de liquidez, que é mais reduzida nestes solos que nos solos argilosos.

2.3. Comportamento mecânico de solos compactados (efeito da água)

A preocupação pelo comportamento dos solos é de extrema importância em projetos de obras de engenharia como se referiu anteriormente. Passa por, necessariamente, conhecer as propriedades físicas e o seu comportamento geotécnico para aquelas que são as diversas solicitações a que estes podem estar sujeitos decorrente destas mesmas características que cada solo imprime, pois, tal como considera Silva (2016):

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

Este comportamento mecânico “engloba todos os aspetos do seu comportamento relacionados, direta ou indiretamente, com os processos de mobilização de resistência ao corte, variação de volume e deformação” (Prietto, 1996 Cit. por Silva, 2016).

Tratando-se de solos compactados, o parâmetro de controlo de qualidade de compactação é a baridade seca máxima teórica que se consegue mediante o controlo do teor em água de compactação, acreditando-se assim que, nestas condições os materiais terão as condições mínimas exigidas nos projetos em que esta técnica é empregue. Assim, assume grande importância o estudo da variação dos parâmetros resistentes dos solos compactados (compressão simples, punçoamaneto, corte por cisalhamento, entre outros) em função da variação dos parâmetros da sua compactação (baridade e teor em água), em especial no que respeita à variação do teor em água de compactação.

Esta correlação pode ser feita tendo em consideração a curva de compactação, que correlaciona o teor em água e a baridade seca teórica e a resistência. Assim, no sentido de se estudar os diferentes comportamentos resistentes dos solos após compactação, podem ser elaborados gráficos de “**curva de compactação versus resistência**” que interessam neste estudo, como se apresenta a seguir.

2.3.1. Resistência à compressão simples

São poucos os casos onde a determinação da resistência à compressão é realizada sobre provetes envolvendo apenas solos. Na sua maioria, a determinação da resistência à compressão uniaxial é realizada em solos tratados com cimento, cal, etc.

No que toca a relação existente entre a resistência e o teor em água de compactação, Faria (2007) constatou que a resistência à compressão simples de um solo diminui com o aumento do teor em água de compactação como se pode observar na figura 4. E, da relação entre a compressibilidade e a resistência o mesmo acresce que “quanto menor for o teor em água de um solo, menor é a sua compressibilidade, e maior é a sua resistência”.

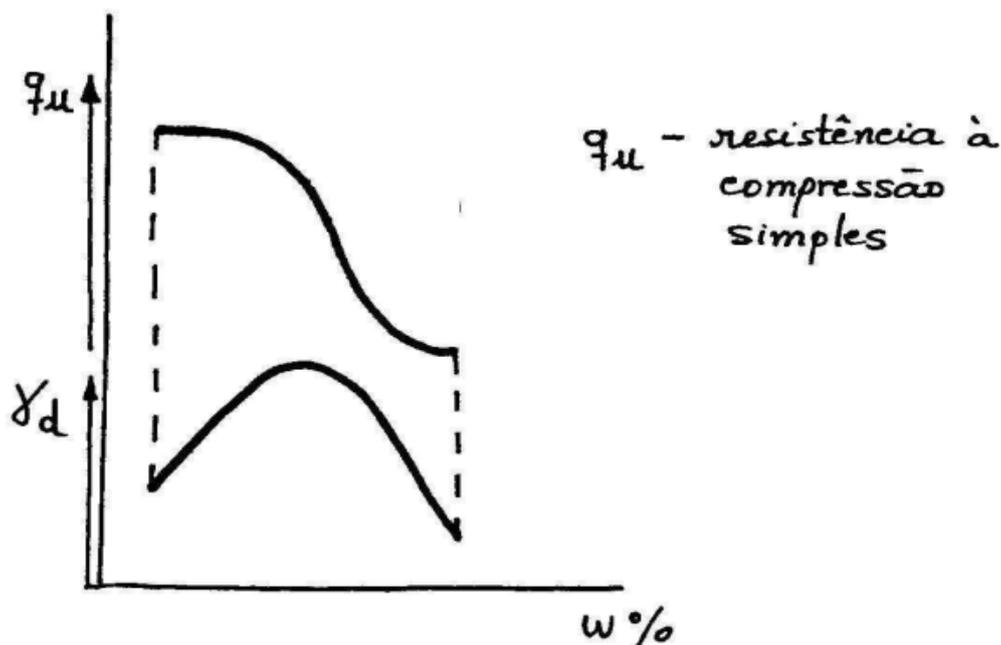


Figura 4. Efeito da compactação na resistência de solos argilosos (Pereira, 2005 Cit. por Faria, 2007)

Por seu turno, sobre os solos tratados com cimento, exemplo, Couto (2018) diz que resultados encontrados na literatura tal como se pode observar na figura 5, indicam que os valores da resistência à compressão uniaxial de solos tratados, aumentam até um valor máximo que corresponde a um valor de teor em água relativamente próximo do teor em água ótimo, a partir do qual decrescem.

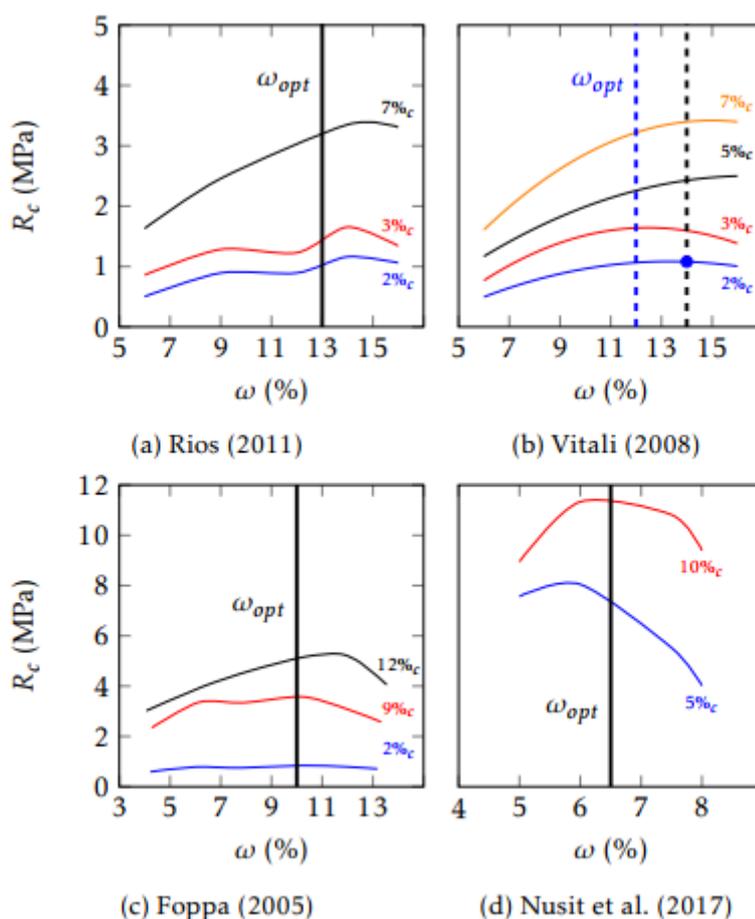


Figura 5. Diferentes estudos relacionando os resultados do efeito do teor em água na resistência à compressão simples de solos tratados com cimento (Couto, 2018)

Embora não constitua objeto de estudo a análise da resistência à compressão simples de solos estabilizados, pode-se tirar daí alguns aspetos importantes no sentido de entender o papel do teor em água nesta resistência.

A utilização de aditivos na estabilização de solos é uma das técnicas mais antigas e utilizada para esse fim. Vários estudos têm reportado a sua utilidade no aumento da resistência à compressão como referem, por exemplo, Cristelo (2001), Cruz (2004), Couto (2018), Alvarez (2020), entre outros.

Segundo Pereira (1970) Cit. por Cruz (2004), os valores de resistência à compressão serão elevados, quanto mais elevados forem os teores de cimento aplicados, sendo que em solos arenosos atingem valores mais elevados que em solos argilosos, evidenciando assim o papel que o tipo de solo envolvido tem nos resultados de resistência à compressão. Assim, as propriedades inerentes aos solos (a granulometria, a plasticidade, a composição química e mineralógicas), influenciam os resultados dos solos tratados.

2.3.2. Resistência à penetração

Segundo Caputo (1988), a resistência à penetração decresce com o aumento do teor em água como se pode observar a partir das curvas abaixo (figura 6).

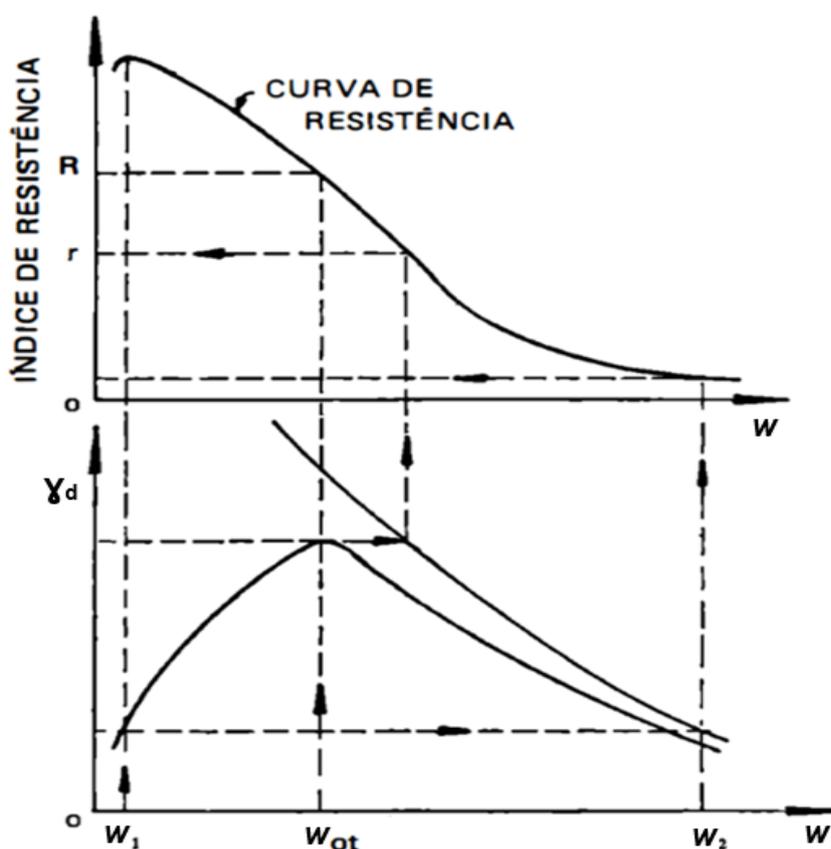


Figura 6. Resistência à penetração versus teor em água (adaptado de Caputo, 1988)

A partir da figura, o teor em água ótimo conduz ao alcance da baridade máxima seca teórica, onde a resistência corresponderia a uma resistência R . Para Caputo (1988):

“À primeira vista pareceria mais conveniente compactar o solo com uma humidade $w_1 < w_{ot}$; pois sua resistência seria elevada; ao mesmo tempo, porém, o maior volume de

vazios facilitaria o acesso da água, dando lugar ao ramo descendente da curva. Acontece, assim, que, saturado o solo (nas épocas de grande precipitação pluviométrica), ele passaria a ter uma humidade w_2 e sua resistência seria praticamente nula. Se, ao contrário, compactarmos o solo na humidade ótima, tal não ocorre, pois se observa que, mesmo no estado de saturação, o solo apresenta, ainda, uma resistência r apreciável.”

2.3.3. Resistência ao corte

Segundo Ribeiro (2008) a compactação para além de permitir uma redução da deformabilidade e permeabilidade, permite um aumento da resistência ao corte de solos.

A resistência ao cisalhamento ou corte de um solo “pode ser definida como a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer rotura, ou a tensão de cisalhamento do solo no plano em que a rotura estiver ocorrida” (Albuquerque, 2003). E, segundo Mckyes (1994) Cit. por Júnior (2020), esta capacidade resistente destes solos é dada pelas características coesivas e friccionais existentes entre as partículas que os constituem e é influenciada pela distribuição de partículas, densidade, teor em água e a estrutura de formação deste mesmo solo.

De acordo com Perdomo (2010) Cit. por Ferreira (2015) num maciço terroso a tensão de corte depende do peso (massa+gravidade) e geometria da vertente / talude. Resulta da conjugação da coesão (c) e do ângulo de atrito interno (ϕ) existente entre as partículas que constituem um determinado solo.

A coesão de acordo com os autores Mullins et al (1990) e Mitchell (1976) Cit. por Júnior (2020) é entendida do ponto de vista real ou aparente. A primeira, resulta de agentes que promovem cimentação das demais partículas, como são o caso dos óxidos e argilas, além de uma atração entre partículas próximas por meio de forças eletrostáticas, daí que um determinado solo em relação ao tipo de partículas que o constitui pode ou não apresentar coesão. Por outro lado, a coesão aparente tem origem “a partir da tensão superficial da água nas capilaridades do solo, promovendo a formação de meniscos entre as partículas de solos parcialmente saturados, os quais tendem a se aproximar e constituir uma parcela da resistência ao corte” (Fredlund & Rahardjo, 1993 Cit. por Júnior, 2020).

Já a fricção (ângulo de atrito interno) é provocada pelo contacto entre as partículas do solo, sendo mais forte quanto mais irregulares e angulosas forem as partículas.

Ainda em relação ao ângulo de atrito, Pinto (2000) Cit. por Júnior (2020) considera que “é dependente de algumas propriedades físicas do solo, tais como: grau de compactação, percentagem e tipo de argila, tamanho e forma dos grãos de areia no solo”.

A compactação depende das questões texturais e composicionais do solo elencados pelo autor, cujos valores satisfatórios só se conseguem controlando a questão do teor em água como é explicado ao longo deste texto.

Ainda em relação à resistência ao corte, num estudo realizado por Faria & Gomes (2004) o aumento do teor em água de compactação suscitou o decréscimo da tensão de resistência ao corte.

Em relação ao teor em água de compactação, segundo Fernandes (1994) Cit. por Ribeiro (2008), no caso de solos coesivos, a experiência revela que a resistência ao corte é máxima quando o solo é compactado no ramo seco, decrescendo com o teor em água, mesmo quando se aproxima do ótimo, ou seja, quando cresce a compactação.

2.3.4. Teor em água ótimo de compactação

Da informação apresentada acima, é notável a importância das propriedades dos solos e da sua compactação. A importância do papel da água na compactação de um determinado solo não deve restringir-se apenas na obtenção da baridade seca máxima teórica, deve incluir o conhecimento do seu comportamento mecânico após compactação. Acontece que um mesmo valor da baridade pode ser obtido tanto no ramo seco, bem como no ramo húmido. Portanto, para qualquer que seja a finalidade, a compactação deverá ser realizada nas condições ótimas de humidade, isto é, nas condições em que a água a adicionar é igual ou próxima do teor em água ótimo de compactação ou como considera Budhu (2010), teores em que se salvaguarda o mínimo de 95% da baridade seca máxima (figura 7).

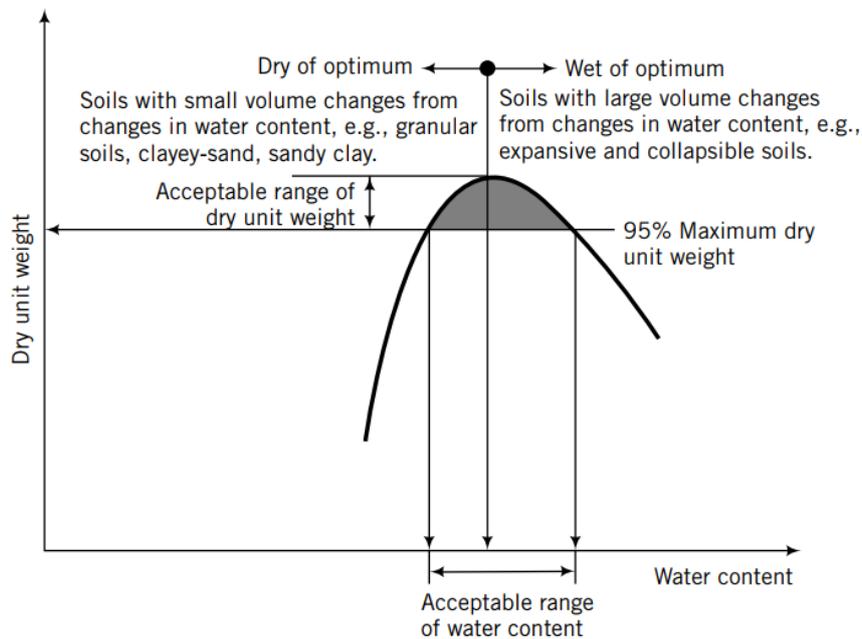


Figura 7. Teores em água aceitáveis para a compactação de solos (Budhu, 2010)

Segundo Budhu (2010) “especificações para estruturas terrestres (aterros, fundações, etc.) geralmente exigem um mínimo de 95% da baridade seca máxima do ensaio Proctor”. Na verdade, uma gama de baridades secas e teores em água aceitáveis onde são garantidas as condições mínimas exigidas às diversas solicitações nestas obras.

Nesta senda, sobre o que acontece (ou poderá acontecer) na compactação de solos em cada um dos ramos da curva, fora do intervalo de valores de teor em água de compactação aceitáveis, Silva (2013) por exemplo, explica que:

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 ao 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.

CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo, pretende-se, de forma sucinta e com base na informação consultada, descrever a metodologia utilizada durante o estudo, que permitiu a obtenção de um conjunto importante de resultados, bem como a sua discussão, a qual levou à consideração de algumas conclusões.

Neste trabalho de investigação, foram realizados ensaios laboratoriais segundo procedimento próprio estabelecido no âmbito deste estudo que, embora muito próximos de procedimentos definidos em normativas ou especificações, não os seguem na íntegra. Este facto decorre da necessidade de analisar aspetos de forma distinta ou em provetes preparados de forma distinta, preconizado nas referidas normas.

3.1. Amostragem

Para a concretização deste estudo importava dispor de algumas amostras de solos, embora a origem ou natureza dos solos não tenha qualquer relevância.

Os solos utilizados nesta investigação têm duas proveniências distintas.

Um primeiro conjunto de 3 amostras de solos, cuja designação se inicia pela letra A, foram colhidos num depósito provisório de solos na fase final dos trabalhos de terraplenagem correspondente ao subtroço Évora Norte – Freixo, da nova ligação ferroviária entre Évora Norte e Elvas / Caia.

Segundo informação prestada na obra, a gestão de solos realizada neste troço, obrigou à criação de depósitos temporários de solos escavados na linha, com qualidade para reutilizar na construção de aterros, reservando-os assim para o momento em que se desenvolvesse a fase de construção de alguns aterros. Aquando da sua reutilização na execução dos aterros, os solos em depósito, eram novamente amostrados e caracterizados de modo que se garantisse o adequado controlo de qualidade da execução das camadas de aterro.

Atendendo a que se trata de solos mobilizados da sua jazida para um depósito temporário, não foi possível confirmar o local de onde terão sido escavados ou a sua origem estratigráfica. Assim, na impossibilidade de fazer corretamente e com rigor o enquadramento geológico e geográfico dos solos representados por estas amostras, tal não é apresentado neste documento.

À vista desarmada, os solos são escuros e correspondem a areia média. São ásperos e pouco friáveis, sendo que os grãos correspondentes a fração fina (minoritária) são arredondados enquanto os correspondentes a fração grossa (maioritária) são subangulosos a angulosos (figura 8). Apesar das referidas características similares nas três amostras, há uma característica peculiar que a amostra A₂ imprime, é mais escura e tem partículas de micas facilmente perceptíveis pelo seu brilho e pela forma lamelar.



Figura 8. Características visuais do conjunto das amostras A

Um segundo conjunto de 3 amostras de solos, cuja designação se inicia pela letra Z, corresponde a amostras de solos da litoteca do laboratório do Departamento de Geociências. Estas amostras são representativas de solos anteriormente sujeitos a caracterização, no âmbito dos trabalhos de investigação para a Dissertação de mestrado de um aluno do mestrado de Engenharia geológica, José Gregório Serrão.

De acordo com Serrão (2018), trata-se de 3 amostras representativas de solos colhidos no troço que se inicia na interceção do IP1/A2 (Grândola) com direção a Figueira dos Cavaleiros, correspondem a materiais de terraços fluviais e depósitos de vertente. Dos 18.550 km extensão do troço, a recolha dos solos efetuou-se na proximidade do Km 5.600.

Contrariamente ao primeiro conjunto de amostras A referidos acima, estes solos são claros e correspondem a areia fina a média. São menos ásperos e mais friáveis, sendo que os grãos correspondentes são arredondados. No entanto, a amostra Z₁ apresenta alguma fração grossa (minoritária) cujos grãos são subangulosos a angulosos (figura 9).



Figura 9. Características visuais do conjunto das amostras Z

3.2. Preparação geral das amostras

A preparação das amostras foi realizada em conformidade com a especificação do LNEC E 195-1966, que estabelece o modo de preparação das amostras quando se recebem no laboratório. Neste âmbito, as amostras foram secas ao ar, destorroadas, repartidas e ensacadas em sacos plásticos devidamente identificados e por fim, conservadas em armazém para a posterior realização dos ensaios.

Aquando da repartição (explicado no ponto 3.2.2.2), houve a preocupação de obtenção de subamostras com dimensão adequada à realização dos ensaios laboratoriais previstos. Assim, embora este aspeto não conste da norma acima referida, foi ainda usada balança para confirmação das massas das subamostras antes de as ensacar e armazenar.

3.2.1. Materiais e instrumentos

- a) Balança mecânica.
- b) Martelo com cabeça revestida de borracha.
- c) Repartidor.
- d) Utensílios diversos, tais como: tabuleiros, alguidares, sacos plásticos, marcadores de acetato, colheres de jardineiro e pedreiro, etc.

3.2.2. Procedimento

3.2.2.1. Secagem e desagregação dos torrões

As amostras foram despejadas em tabuleiros de grandes dimensões, espalhadas e mantidas ao ar durante dias até haver garantia de secagem suficiente (fig. 10.a, b, c) para permitir a fase subsequente dos trabalhos. Depois de seca, a especificação recomenda que os torrões sejam desagregados por meio de almofariz e pilão com mão revestida de borracha, ou dispositivo

mecânico capaz de produzir a desagregação, sem, entretanto, reduzir o tamanho individual das partículas. Para esse fim, com a amostra despejada sobre um saco plástico e apoiado sobre a bancada, utilizou-se um martelo de borracha (fig. 10.d).

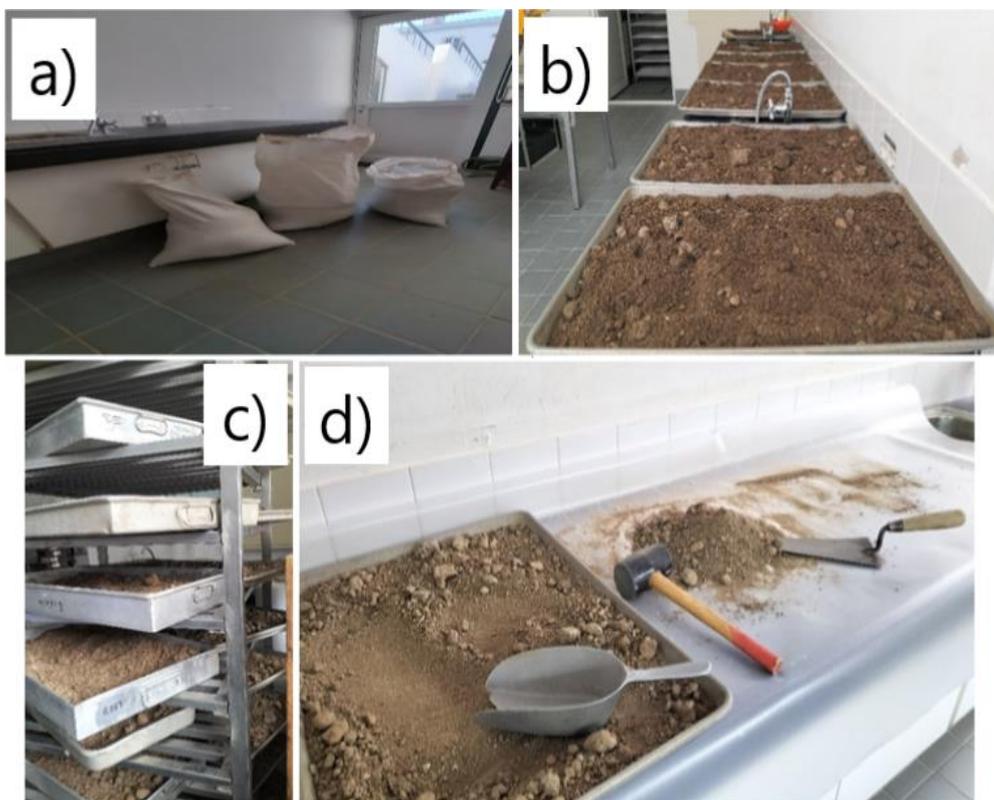


Figura 10. Preparação de amostras: a-receção das amostras; b – espalhamento de amostra; c-secagem; d-desagregação dos torrões

3.2.2.2. Redução da amostra

A seguir, foi realizada a redução das amostras. Recorreu-se à NP-932-2 (2002) para a redução da amostra utilizando o repartidor e divisão em 1/2, segundo a qual se divide a amostra em duas subamostras com aproximadamente a mesma massa.

O método consiste em colocar a amostra em todo o comprimento do repartidor, de forma centrada, de uma ponta a outra e continuamente, com dois recipientes colocados em posição de recolher as partes da amostra a repartir. Cada uma das subamostras é então sujeita a nova repartição (obtendo-se assim outras 2 subamostras correspondendo, cada uma delas, a um quarto da amostra inicial). Este processo de repartição de subamostras repete-se sucessivamente, até que sejam obtidas as subamostras com massa pretendida para cada ensaio planeado (fig. 11).

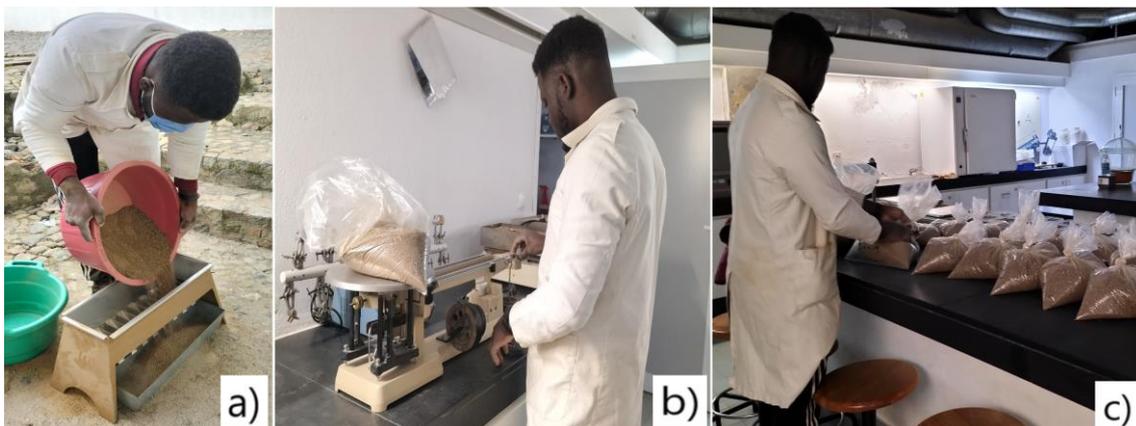


Figura 11. Preparação de amostras: a) redução da amostra; b) pesagem; c) conservação das subamostras

Os provetes para a compactação proctor foram conseguidos repartindo as amostras até 32 avos (fig. 12). Para os ensaios de identificação, nomeadamente a granulometria e os limites de consistência, a repartição continuou porque estes ensaios requerem provetes com dimensões inferiores. No caso da análise granulométrica, as subamostras corresponderam a 64 avos das amostras iniciais. Para os limites, por ser um ensaio que requer ainda menor quantidade de solo, as subamostras obtiveram-se juntando as partes de 32 e 64 avos que, depois de juntas se voltaram a repartir para permitir a obtenção de subamostras com massa adequada para este ensaio (fig. 13).

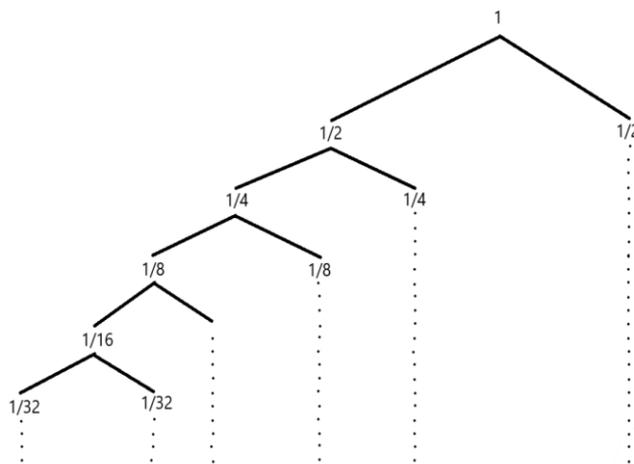


Figura 12. Esquema de repartição de amostras para provetes destinados à compactação Proctor

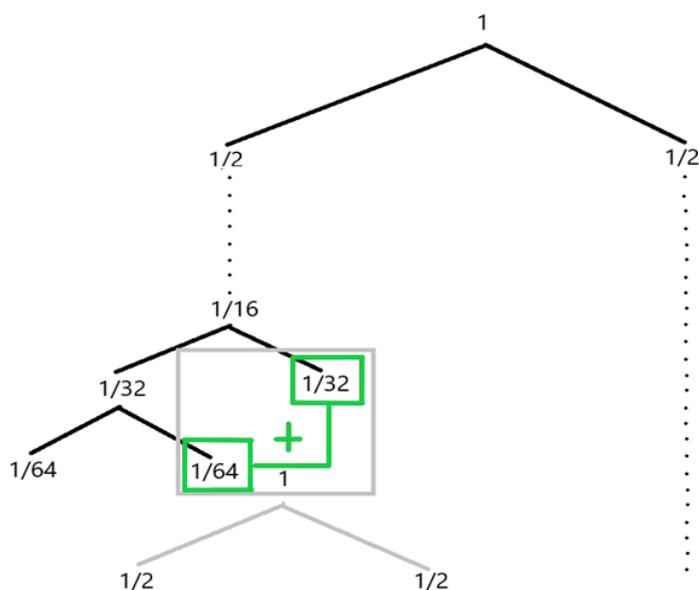


Figura 13. Esquema de repartição de amostras usado para obtenção de provetes destinados para os ensaios de identificação

3.3. Realização dos ensaios

Após a preparação das amostras havia condições para se iniciar a realização dos ensaios físicos e mecânicos, que interessavam à concretização deste estudo e cuja metodologia de execução se descreve seguidamente:

3.3.1. Determinação do teor em água

Após a amostragem e antes da preparação geral das amostras, procedeu-se à determinação do teor em água no estado natural das amostras realizada com referência à NP-84 (1965).

Do mesmo modo, no âmbito da realização dos restantes ensaios de laboratório, foi necessário usar a mesma metodologia para determinação de teor em água dos provetes ensaiados.

3.3.1.1. Materiais e instrumentos

- a) Estufa controlada termostaticamente, capaz de manter a temperatura de 105-110 °C.
- b) Balança para pesagens com limites de erro de $\pm 0,1$ g.
- c) Copos de vidro, de boca larga circular, resistentes à humidade e ao calor.
- d) Exsiccador com sílica-gel anidra, para a conservação dos provetes.
- e) Espátula e tabuleiro para o manuseamento dos provetes.

3.3.1.2. Procedimento

Previamente identificados, cada copo destinado para esta determinação foi pesado e com ajuda do marcador de acetato, registada a massa do copo (fig. 14.a, b). A seguir, introduz-se dentro do copo a quantidade de provete necessária com recurso à espátula, seguida da pesagem e do registo da massa do conjunto, isto é, da massa do copo mais a do provete antes de o sujeitar a secagem. Depois, cada provete ou conjunto de provetes, nos respetivos recipientes, é levado à estufa onde permanecem durante pelo menos 24h, tempo suficiente para permitir a sua secagem com confirmação de massa constante (fig. 14.c). Passado este tempo, tiram-se os provetes da estufa e deixam-se arrefecer no exsicador (fig. 14.d). Já arrefecidos, voltam-se a pesar, registando-se a massa do copo mais a do provete depois de seco (fig. 14.e).

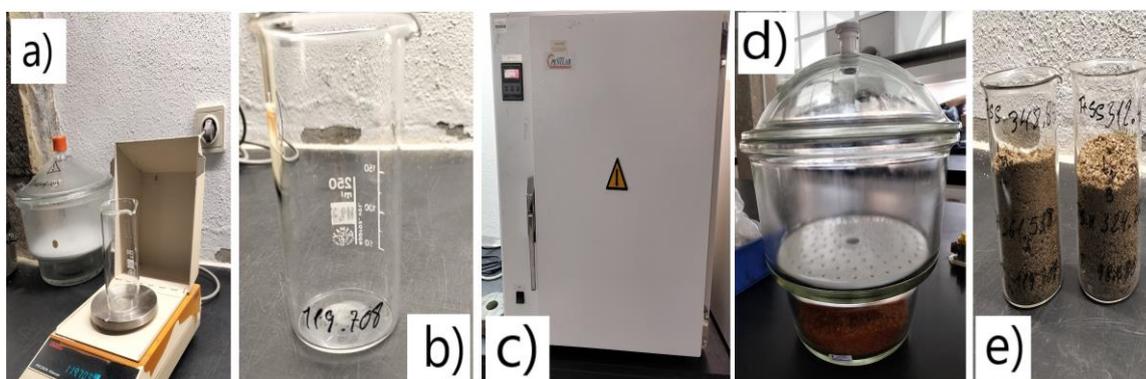


Figura 14. Determinação do teor em humidade: a) – pesagem do copo; b) – copo identificado e com massa registada; c) – estufa; d) – exsicador; e) – provetes depois de secos e anotadas todas as massas

3.3.1.3. Cálculos

O teor em água, cujo valor se apresenta em percentagem e arredondado às décimas, é obtido dividindo a massa de água que se evapora do provete pela massa do mesmo depois de seco, através da seguinte expressão:

$$\frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100$$

em que,

m_1 - massa do recipiente.

m_2 - massa do recipiente e do provete antes da secagem.

m_3 – massa do recipiente e do provete seco.

3.3.2. Análise granulométrica

Para a granulometria, optou-se pela via húmida. A preparação e a análise granulométrica por peneiração húmida são realizadas conforme a especificação E 239-1970, embora se tenha executado a peneiração da totalidade da amostra por via húmida, e não somente a fração constituída pelas partículas de calibre superior a 2 mm, como indica a referida norma.

3.3.2.1. Materiais e instrumentos

- a) Série de peneiros ASTM de malha quadrada com as seguintes aberturas: 2,00 mm (nº 10), 0,841 mm (nº 20), 0,420 mm (nº 40), 0,250 mm (nº 60), 0,105 mm (nº 140) e 0,074 mm (nº 200).
- b) Balança para pesagens com limites de erro de $\pm 0,1$ g.
- c) Balança para pesagens com limites de erro de $\pm 0,01$ g.
- d) Recipientes para recolha do material retido em cada peneiro.
- e) Estufa controlada termostaticamente, capaz de manter a temperatura de 105-110 °C.
- f) Exsiccador de vidro.
- g) Frasco de lavagem por esguicho com água destilada.
- h) Utensílios diversos, tais como: tabuleiros, alguidares, marcadores de acetato, etc.

3.3.2.2. Procedimento

Seca-se a amostra em estufa até peso constante e depois de arrefecida, determina-se o valor da sua massa total (m_t).

Inicia-se então o processo de peneiração da amostra por via húmida.

Para o efeito, utilizou-se uma série de peneiros ASTM de malha quadrada com as seguintes aberturas: 2,00 mm (nº 10), 0,841 mm (nº 20), 0,420 mm (nº 40), 0,250 mm (nº 60), 0,105 mm (nº 140) e 0,074 mm (nº 200) como ilustra a figura 15 a seguir.



Figura 15. Peneiração de solos por via húmida

Depois de seca, pesada e registada a massa total do provete (m_t), peneira-se através dos peneiros acima referidos. Coloca-se a amostra no peneiro de maior abertura da série, peneiro nº 10 e, com recurso ao jato de água vai-se peneirando cuidadosamente para não perder material, fazendo passar as partículas através da série de peneiros, com ajuda do jato de água até ao peneiro de menor abertura, peneiro nº 200, sendo rejeitado o material que passa neste último peneiro referido. Terminada a separação do solo, são então transferidas para um conjunto de recipiente todas as partículas das frações retidas em cada peneiro, ficando assim as frações separadas por calibres.

Essa transferência fez-se primeiro para um alguidar, e com recurso ao frasco de lavagem por esguicho com água destilada transferiu-se seguidamente para um copo previamente identificado (reduz-se a quantidade da água nos copos anteriormente usada na transferência, sem permitir a perda de partículas) como se pode ver na figura 16, abaixo. As frações retidas em cada peneiro e reservadas nos copos são então secas em estufa a $105^\circ (\pm 5^\circ\text{C})$, até massa constante.



Figura 16. Material retido em cada peneiro

Atingida a massa constante após secagem, faz-se o arrefecimento das frações colocando os recipientes num exsiccador e regista-se o valor da massa da fração retida em cada peneiro m_x .

3.3.2.3. Cálculos

Após a peneiração e conhecida a massa retida em cada peneiro, determina-se a percentagem de cada fração de acordo com a expressão matemática a seguir:

$$N_x = \frac{m_x}{m_t} \times 100$$

em que,

m_x – massa do material retido no peneiro n.ºx.

m_t – massa total da amostra usada na peneiração.

Calculam-se ainda os valores das percentagens retidas acumuladas (N'_x) referentes a cada peneiro n.º x que é obtida somando a percentagem retida nesse peneiro (N_x) às percentagens retidas nos peneiros de malha mais larga, bem como, o valor da percentagem acumulada do material que passa em cada peneiro (N''_x) através da expressão matemática seguinte:

$$N''_x = 100 - N'_x$$

em que,

N'_x – percentagem retida acumulada no peneiro x .

N''_x – percentagem acumulada que passa no peneiro x .

A apresentação dos resultados, isto é, da fração retida (N_x), da percentagem retida acumulada (N'_x) e da acumulada que passa (N''_x) em cada peneiro, é feita através de uma tabela e de um gráfico correspondente a essa mesma distribuição granulométrica.

3.3.3. Limites de consistência

A determinação dos limites de consistência realizou-se em conformidade com a norma NP-143 (1969), que estabelece o modo de execução dos ensaios.

Tal como os demais ensaios que são aqui descritos, a preparação dos provetes levou em consideração a pré-preparação ou melhor, a preparação geral das amostras descrita no ponto 3.2. Assim, os provetes usados para este ensaio, resultantes da repartição geral da amostra total, foram separados em duas frações com recurso ao peneiro de 0,420 mm (n.º 40). Do material passado neste peneiro, conservaram-se 250 g para a realização dos ensaios.

3.3.3.1. Limite de liquidez

3.3.3.1.1. Materiais e instrumentos

- a) Concha de Casagrande – aparelho essencialmente constituído por uma calote esférica de latão, com 2 mm de espessura e por um dispositivo mecânico que permite levantar a calote que em seguida cai, de altura regulável, sobre uma base de madeira, de borracha ou outro material de características idênticas.
- b) Riscador – peça metálica, com uma das extremidades em perfil triangular com o vértice truncado numa largura de 2 mm, e a outra com o calibre de 10 mm, destinado a permitir regular a altura de queda da concha de Casagrande.
- c) Recipiente de metal usado para preparar a pasta.
- d) Espátula para preparar a pasta de solo com água destilada.
- e) Frasco de lavagem por esguicho com água destilada.
- f) Aparelhos e utensílios necessários à determinação do teor em água de um provete de solo.

3.3.3.1.2. Procedimento

Reunidos todos os requisitos necessários à realização do ensaio, incluindo o da calibração do funcionamento da concha de Casagrande, das 250 g de solo preparadas, tomam-se 100 g da fração de solo reservada que se amassam num recipiente com água destilada, e com recurso à espátula, até se formar uma pasta homogénea e consistente. Para a execução do ensaio, toma-se uma porção da pasta preparada e coloca-se na concha de modo a se obter uma camada, não muito comprimida, com a espessura máxima de 1 cm e com a superfície nivelada. Faz-se nela, de seguida, um sulco que deve ser obtido deslocando o riscador segundo o diâmetro da concha normal ao eixo da manivela e mantendo-o perpendicular à superfície da concha.

Aciona-se, em seguida, a manivela, à razão de 2 voltas por segundo, até que as duas porções do provete, devido às pancadas da concha sobre a base, entrem em contato pela parte inferior do sulco numa extensão de 1 cm, anotando-se o número de pancadas correspondente. A seguir, retiram-se, com a ponta da espátula, cerca de 10 g do provete da zona do sulco em que se deu a união e procede-se à determinação do seu teor em água. Importa salientar que este procedimento se repete sobre cada um dos provetes ensaiados (fig. 17).

Importa referir ainda, que os 4 (ou mais) provetes são escolhidos de modo que o número de pancadas necessárias para unir os bordos dos sulcos varie entre 10 e 40, e se distribuam, parcialmente, abaixo de 25 e os restantes, acima deste valor.



Figura 17. Determinação do limite de liquidez: a) – materiais necessários e b) – execução do ensaio

3.3.3.1.3. Cálculos

Determinados os valores dos teores em água de todos os provetes testados, traça-se uma curva, relacionando o teor em água de cada um dos provetes com o correspondente número de

pancadas, num diagrama em que se marca, em ordenadas, o teor em água em escala aritmética, e em abcissas o número de pancadas em escala logarítmica.

Com os pontos projetados (valor de n.º de pancadas versus teor em água, de todos os provetes), traça-se então a curva de melhor ajuste.

O limite de liquidez da amostra ensaiada é dado pelo teor em água correspondente a 25 pancadas, obtido por interpolação na curva traçada anteriormente referida. Tratando-se de um teor em água, o resultado é expresso em percentagem e apresenta-se arredondado à unidade. No entanto, como se refere a norma, em caso de não se conseguir determinar o limite de liquidez, indica-se que o solo é “não plástico”.

3.3.3.2. Limite de plasticidade

3.3.3.2.1. Materiais e instrumentos

- a) Placa de vidro plana sobre a qual se possa rolar o provete.
- b) Frasco de lavagem por esguicho com água destilada.
- c) Espátula para preparar a pasta de solo com água destilada.
- d) Aparelhos e utensílios necessários à determinação do teor em água de um provete de solo.

3.3.3.2.2. Procedimento

Das 250 g de solo preparadas, descritas anteriormente, no ponto 3.3.3, toma-se uma pequena porção de solo, cerca de 20 g, que se amassam à espátula com água destilada, até que a massa se torne suficientemente plástica para permitir moldar com facilidade pelo menos quatro pequenas esferas de diâmetro sensivelmente iguais.

Posto isto, rola-se a esfera previamente preparada entre a palma da mão e a placa de vidro, com pressão suficiente para a transformar num filamento cilíndrico. Quando o diâmetro do filamento atinge cerca de 3 mm, volta-se a formar a esfera e a rolá-la de novo, e continuam-se estas operações até que devido à progressiva secagem do provete, se dê a rotura do filamento quando o seu diâmetro atinge cerca de 3 mm. Juntam-se então num copo as frações do filamento obtido e determina-se o seu teor em água (fig. 18).

Tal como acontece na determinação do limite de liquidez, este procedimento repete-se sobre cada um dos provetes ensaiados.

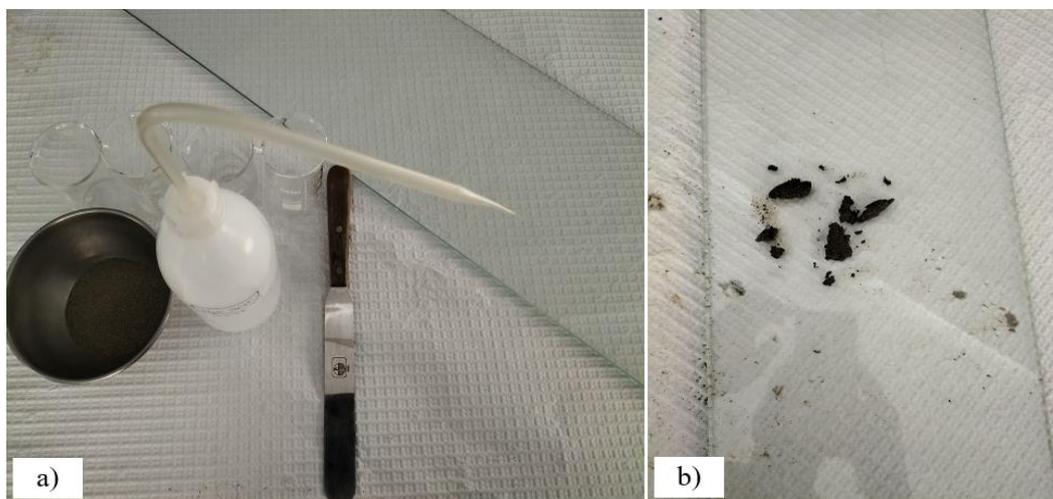


Figura 18. Determinação do limite de plasticidade: a) – materiais necessários e b) – execução do ensaio

3.3.3.2.3. Cálculos

Determinados os valores dos teores em água de todos os provetes testados, calcula-se então o valor do limite de plasticidade da amostra ensaiada, que corresponde à média dos teores em água determinados para todos os provetes.

O resultado é expresso em percentagem e apresenta-se arredondado à unidade. Contudo, no caso de não ser possível a determinação do mesmo, conforme recomenda a norma, indica-se que o solo é “não plástico”.

3.3.4. Ensaio de compactação

A compactação do tipo Proctor realizou-se com base na especificação do LNEC E 197-1966. No caso deste estudo utilizou-se compactação pesada em molde grande.

Para cada amostra da série A, compactaram-se provetes com teores em água de, aproximadamente, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% e 14% para se conhecer o teor em água ótimo.

Resumidamente, a compactação realizou-se, executando as seguintes tarefas principais (detalhadas no ponto 3.3.4.2):

- 1) Determinação da dimensão interna do molde;
- 2) Humedecimento do provete;
- 3) Homogeneização e divisão do provete em cinco (5) frações, aproximadamente iguais;
- 4) Compactação do provete, camada a camada, até completar as cinco camadas;
- 5) Rasamento do provete compactado;
- 6) Pesagem do provete dentro do molde (sem a longa);
- 7) Extração do provete do molde e colheita de porções do provete para a determinação do teor em água.

3.4.3.1. Materiais e instrumentos

- a) Compactador mecânico (marca TECNILAB e modelo MOD 500 B) (fig. 19).
- b) Molde grande – molde cilíndrico de aço, com 152 mm de diâmetro e 178 mm de altura, munido de longa, base, sem, portanto, o espaçador (fig. 20).
- c) Pilão de compactação pesada, com 4,54 kg de massa, 457 mm de altura de queda e base de compactação de 50 mm de diâmetro.
- d) Extrator de provetes.
- e) Balança para pesagens com limites de erro de ± 1 g.
- f) Rasoira com aresta biselada.
- g) Copos volumétricos de vidro de 250 cm³ e de 1000 cm³.
- h) Paquímetro;
- i) Exsiccador de vidro.
- j) Utensílios diversos, tais como: tabuleiros, alguidares, frasco de lavagem por esguicho, marcadores de acetato, colheres de jardineiro e pedreiro, etc.



Figura 19. Compactador mecânico

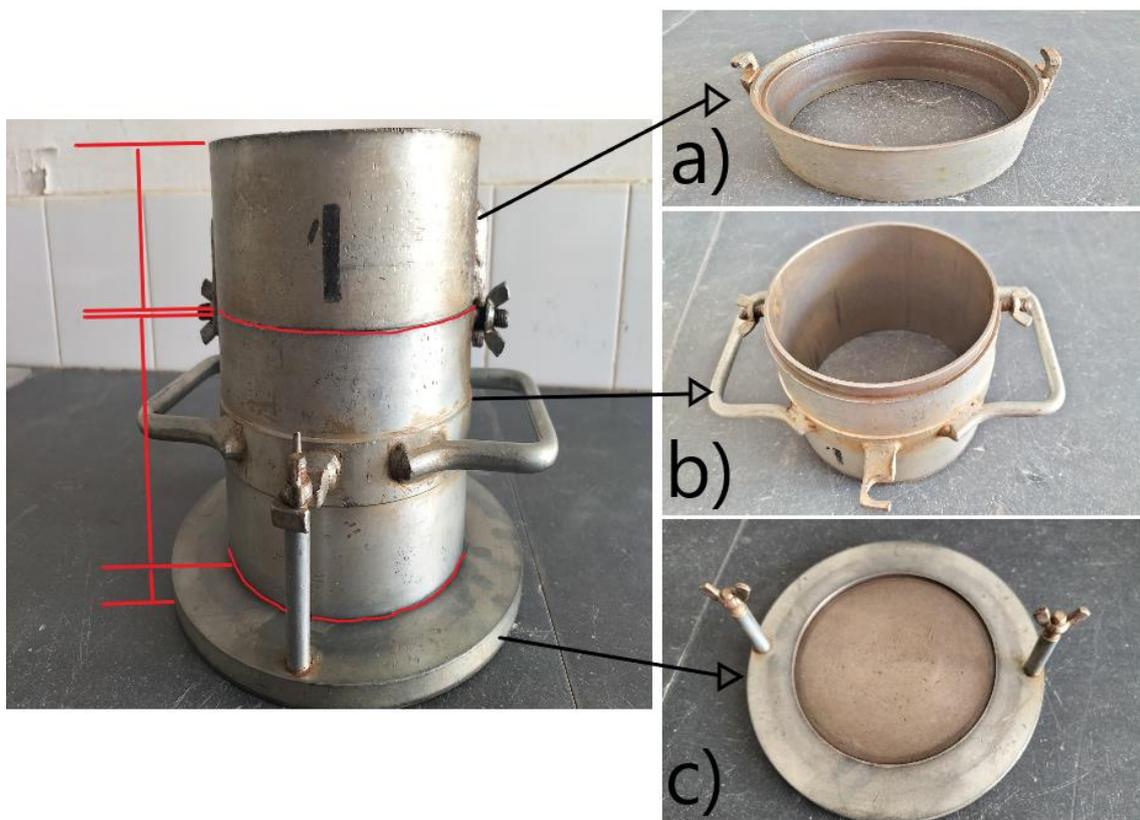


Figura 20. Conjunto molde montado para o ensaio: a) longa; b) molde; c) base

3.3.4.2. Procedimento

1) Medição do molde e marcação do tabuleiro

A determinação da dimensão do molde foi realizada com objetivo de conhecer o seu volume e massa. Assim, com recurso ao paquímetro, mediu-se a altura e o diâmetro (em centímetros) de onde se obteve o raio usado na fórmula, dividindo-o por dois (fig. 21).



Figura 21. Determinação do volume do molde

A seguir à determinação das dimensões do molde e antes do humedecimento dos provetes, o tabuleiro usado foi previamente marcado com quatro marcas ao longo da borda maior, que o dividem em cinco partes idênticas (fig. 22), setas a vermelho² para servirem de referência durante divisão do solo em cinco porções idênticas para a respetiva compactação em cinco camadas idênticas.

² Mediu-se com a régua o comprimento do tabuleiro e dividiu-se por cinco, marcando-se desta forma, quatro pontos para permitir a divisão.



Figura 22. Marcação do tabuleiro

2) Humedecimento de provete

A seguir efetuou-se o humedecimento de provetes, cujo teor em água previamente determinado (de acordo com o mesmo procedimento explicado no ponto 3.3.1), uma vez que após a secagem, o teor em água difere daquele obtido aquando da receção das amostras no laboratório. A água a adicionar no âmbito do humedecimento leva em consideração o teor em água que os provetes ainda possuem, por isso, a sua adição é a necessária compensação àquela já existente, para se obter o valor de humedecimento pretendido para cada provete a compactar. Conhecida a quantidade de água a adicionar, mede-se esse valor (em massa) de água e despeja-se a água sobre o provete a humedecer, previamente colocado no tabuleiro (fig. 23. b, c).



Figura 23. Humedecimento de provetes: a) medição da água a adicionar; b) provete previamente colocado no tabuleiro e pronto a humedecer; c) humedecimento de provete

3) Homogeneização e divisão do provete em frações

Nesta fase, com recurso à colher de pedreiro, remexeu-se o solo, de forma contínua, até que a água adicionada se distribuisse homogeneamente pelo provete (fig. 24.a, b). Após se garantir a homogeneidade do provete, este foi espalhado, alisado e de seguida, dividido em cinco frações (fig. 24.c).



Figura 24. Homogeneização e divisão do provete: a) homogeneização; b) provete homogeneizado; c) provete dividido em cinco porções, aproximadamente, iguais

4) Compactação do provete (compactação pesada em molde grande)

Para cada provete preparado, transfere-se a primeira porção de solo humedecido, do tabuleiro para o molde com a alonga, com recurso a colher de pedreiro e um tabuleiro de menor dimensão.

A transferência da primeira fração fez-se com o molde fora da base do compactador (fig. 25.a). Feita a transferência, transporta-se o molde até à base do compactador e de seguida, prende-se o molde à base (fig. 25.b). Com o compactador ligado à tomada, carrega-se no botão correspondente ao ciclo de 55 pancadas e a máquina passa a realizar a compactação da primeira fração até completar o ciclo (fig. 25.c). Para as restantes quatro porções de solo, a transferência fez-se mantendo-se o molde fixado na base do compactador (fig. 26). Este procedimento repetiu-se para cada fração de cada provete e para todos os provetes ensaiados.



Figura 25. Transferência e compactação da primeira parte: a) transferência do tabuleiro maior para o de menor; b) transferência do tabuleiro menor para o molde; c) molde preso à base do compactador



Figura 26. Compactação das restantes quatro partes do provete

5) Rasuramento do provete compactado

Após a compactação das cinco frações de cada provete, desprende-se o molde da base do compactador e transfere-se até o tabuleiro, sobre a bancada (fig. 27.a). A seguir, remove-se a longa (fig. 27.b) e com a rasoira, raspa-se cuidadosamente o provete, de forma a remover todo o excesso de solo compactado acima do topo do molde (anteriormente contido na alonga) (fig. 27.c).



Figura 27. Rasuramento do provete: a) transferência do molde com provete compactado; b) remoção da longa; c) processo de rasar o provete

6) Pesagem do provete

Após o processo descrito acima, remove-se o molde da base, escova-se e pesa-se o molde contendo o provete e regista-se a sua respetiva massa (fig. 28).



Figura 28. Pesagem do molde contendo o provete

7) Extração do provete e determinação do teor em água

A seguir à pesagem, efetua-se a extração do provete contido no molde com recurso ao extrator (fig. 29) e retiram-se algumas porções do provete para a determinação do teor em água (fig. 30) conforme é explicado anteriormente, no ponto 3.3.1.



Figura 29. Extração de um provete após compactação



Figura 30. Toma de porções do provete para a determinação do teor em água

3.3.4.3. Cálculos

A baridade seca do solo γ_s é calculada, para cada provete, pela expressão abaixo:

$$\gamma_s = \frac{\gamma_w}{100 + w} \times 100$$

Em que,

γ_s – baridade seca do solo.

γ_w – baridade húmida do solo, que é o quociente da massa do provete, pela capacidade do molde utilizado, expressa em centímetros cúbicos.

w – Teor em água do solo, expresso em percentagem.

Após o cálculo, traça-se a curva da baridade seca versus teor em água, marcando em ordenadas os valores das baridades secas e em abcissas os respectivos valores do teor em água. Com a curva traçada, determinam-se os valores do teor em água ótimo de compactação e da baridade seca máxima, valores que correspondem ao ponto máximo da curva. A baridade seca máxima apresenta-se em gramas por centímetro cúbico, arredondada às centésimas e o teor em água ótimo apresenta-se em percentagem, arredondado às décimas.

3.3.5. Ensaio de resistência à compressão

Determinou-se a resistência à compressão uniaxial dos provetes utilizando a prensa de compressão uniaxial. Para a realização deste ensaio utilizaram-se provetes com diferentes teores de água, previamente compactados como descrito no ponto 3.3.4.

O ensaio realizou-se à semelhança dos princípios e procedimentos estabelecidos nas normas que orientam a determinação da resistência à compressão simples (uniaxial) em pedra natural, betões e em solo-cimento, isto é, as normas NP 1926 (2008), NP 12390 (2009) e a especificação do LNEC E 264-1972 que se aproxima mais aos solos, por não dispormos de uma norma exclusivamente dedicada para este fim.

3.3.5.1. Materiais e instrumentos

- a) Prensa de compressão Uniaxial PEGASIL (fig. 31).
- b) Placas metálicas com a função de elevar a altura do prato onde se assenta o provete.
- c) Utensílios diversos: tabuleiros, espátulas, etc.



Figura 31. Prensa usada para o carregamento dos provetes

3.3.5.2. Procedimento

Cada provete resulta da compactação pesada do solo e tem forma cilíndrica, pelo que se procedeu à determinação da área da base, dado necessário ao cálculo posterior do valor da tensão de carregamento e rotura. Para executar a compressão, os provetes foram centrados sobre o prato da prensa e seguidamente, após ser introduzida no sistema informático da prensa a informação relativa à identificação do provete e dados da sua geometria, dá-se início ao ensaio acionando a prensa que aplica uma força uniformemente distribuída através dos seus pratos, com uma velocidade média constante até ocorrer a rotura do provete (fig. 32.a).

Durante o ensaio, no painel digital da prensa pode observar-se a evolução do carregamento do provete, com registo do aumento da força aplicada (N) ao longo do tempo (s), como o ilustrado na figura 32.b, abaixo.

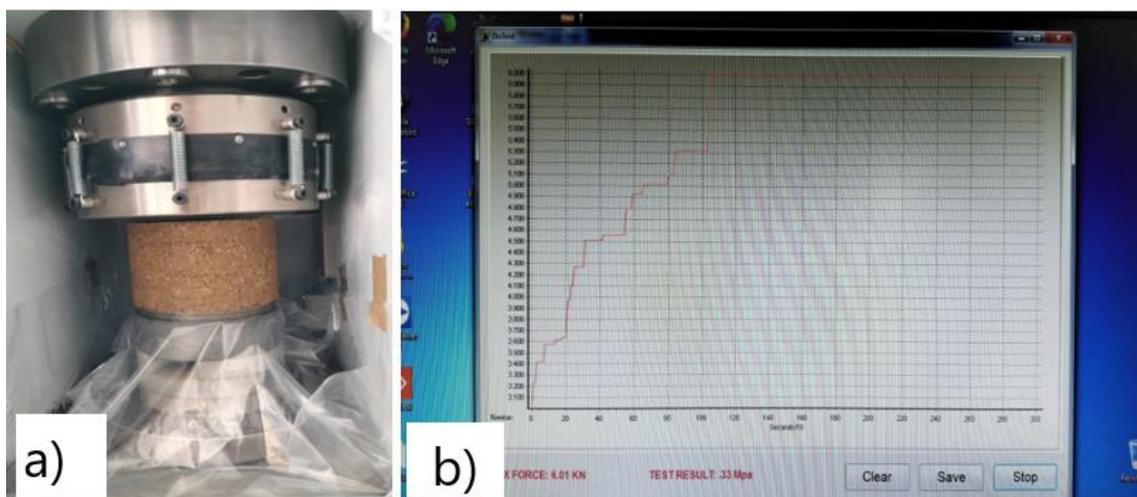


Figura 32. Ensaio de resistência à compressão uniaxial: a) colocação de provete sobre o prato; b) dados apresentados durante o carregamento

Depois da realização de cada ensaio, retirou-se parte do provete para a determinação do teor em água e colheram-se fotografias que evidenciam o tipo de rotura (fig. 33) e ajudam na validação do ensaio. Por último grava-se o registo gráfico obtido na execução do ensaio.

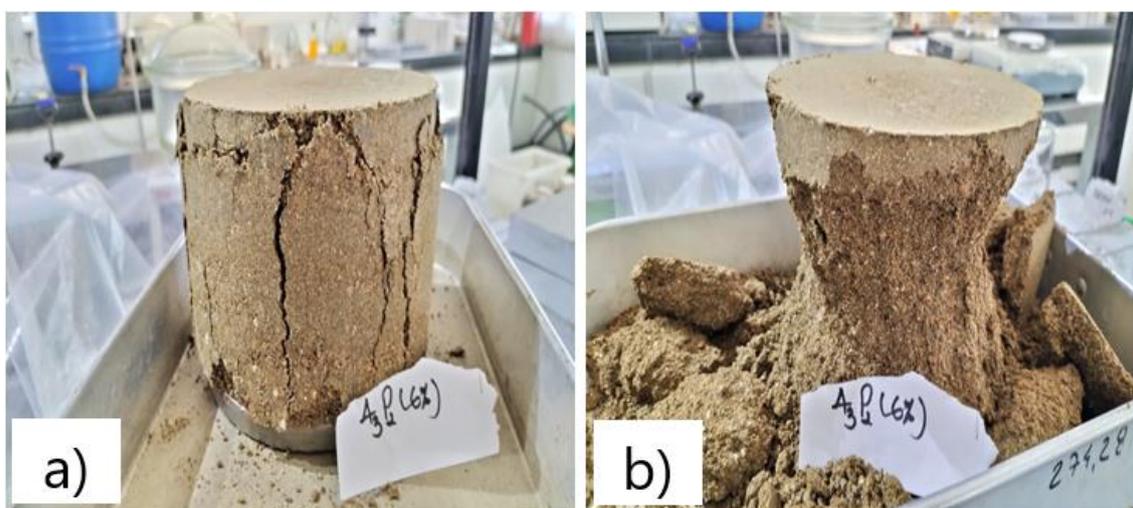


Figura 33. Tipo de rotura observado durante as compressões: a) – provete antes da remoção da massa que realça as fissuras externas criadas durante a compressão; b) – provete após remover a massa de solo solta, exterior à superfície de rotura

3.3.5.3. Cálculos

De acordo com as especificações, a tensão de rotura por compressão uniaxial de cada provete, expressa em quilogramas-força por centímetro quadrado, é dada pela expressão abaixo:

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

Em que,

R – resistência à compressão.

F – força de rotura, em quilogramas-força.

A – área da secção transversal do provete, em centímetros quadrados.

Os resultados devem ser arredondados a 0,5 kgf/cm².

3.3.6. Ensaio de resistência ao punçoamento

Determinou-se também a resistência ao punçoamento dos provetes compactados, utilizando a prensa de CBR, conforme a especificação LNEC E 198-1967.

Este é um procedimento desenvolvido neste estudo experimental que toma como referência norma do CBR, somente porque utiliza uma prensa de CBR para a sua concretização.

3.3.6.1. Materiais e instrumentos

- a) Prensa de CBR (da marca ELE *International*) (fig. 34).
- b) Cronómetro;
- c) Defletómetros.

3.3.6.2. Procedimento

Após a compactação, instala-se o molde na prensa, bem centrado, e ajusta-se o pistão montado na prensa, através do qual se fará o punçoamento do provete (fig. 35), fazendo-o tocar no topo do provete. Confirma-se que o defletómetro instalado no anel dinamométrico esteja na posição zero. A seguir, num referencial imóvel, instala-se o suporte com outro defletómetro para medição de deslocamentos sofridos pelo provete, colocando-o numa das pegas do molde e ajustando-o a zero. O deslocamento do molde corresponde à subida do prato da prensa onde este está colocado, bem como à penetração do pistão. Na verdade, o pistão penetra porque o prato da prensa sobe, sendo essa penetração de valor igual e sentido oposto à deslocação do prato da prensa.



Figura 34. Prensa de CBR da ELE International

De seguida, carrega-se o provete por meio do pistão, acionando a prensa de CBR (que inicia o movimento de subida do prato onde repousa o molde com o provete).

A força do pistão aplica-se à velocidade uniforme de penetração de 1mm/min e fazem-se as leituras das forças às penetrações de 0,5, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 4,0, 5,0, 6,0, 7,5, 10,0 e 12,5 mm, à semelhança do que se pratica no ensaio de CBR.

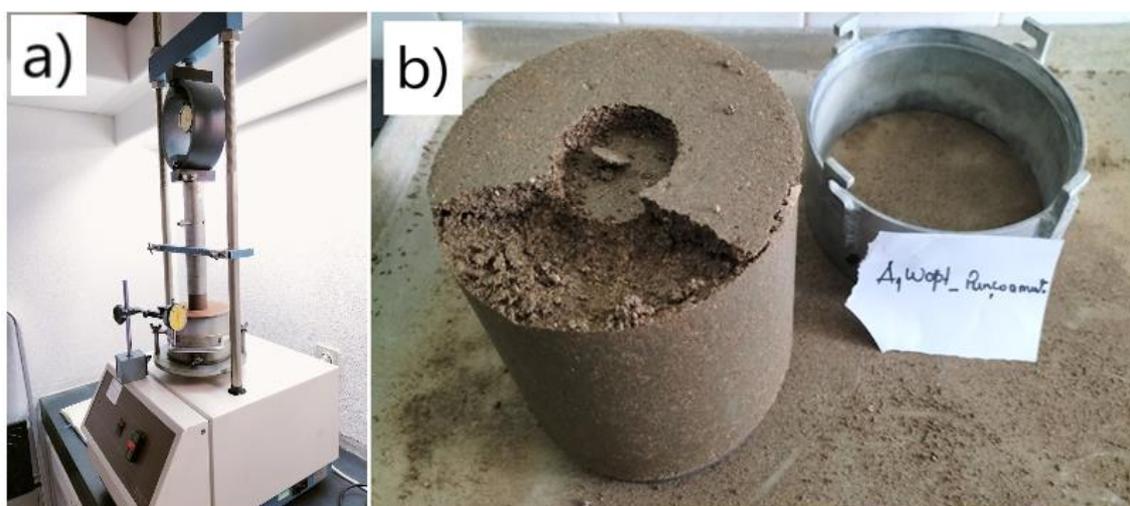


Figura 35. Execução do ensaio de determinação da resistência ao punçoamento: a) – Montagem do ensaio e carregamento de provete; b) – provete extraído após o carregamento

A seguir, retira-se o molde da prensa, extrai-se o provete e colhe-se uma porção de solo para a determinação do teor em água (fig. 36).



Figura 36. Extração e recolha de porções do provete para a determinação do teor em água

3.3.6.3. Cálculos

Após a realização do ensaio, o punçoamento (resistência à penetração) de cada provete, obtém-se, dividindo a força de penetração pela secção transversal do provete, correspondente a área penetrada pelo pistão, pela expressão abaixo:

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

Em que,

R – resistência ao punçoamento (à penetração).

F – força de penetração, em quilogramas-força.

A – área da secção transversal do provete, penetrada pelo pistão, em centímetros quadrados.

3.3.7. Ensaio de resistência ao corte direto

Segundo Caputo (1988):

“A resistência ao cisalhamento de um solo é, usualmente, determinada no laboratório por um dos seguintes ensaios:

cisalhamento direto

compressão triaxial

compressão simples”.

Para a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, neste estudo usou-se o ensaio de corte direto, realizado sobre provetes previamente compactados com os teores em água conhecidos. Para cada teor em água de compactação, foram realizados três ensaios, com cargas de 1, 2 e 3 kgf, respectivamente.

3.3.7.1. Materiais

- a) Máquina de Corte direto da marca e modelo *WYKEHAM 25492* da *Farrance Engineering, LTD* (fig. 37).
- b) Cronómetro;
- c) Caixa de corte 3,00 x 3,00 mm.
- d) Amostrador 3,00 x 3,00 mm.
- e) Utensílios diversos, tais como: tabuleiros, marcadores de acetato, espátula, etc.



Figura 37. Máquina de corte direto

3.3.7.2. Procedimento

Previamente à realização do ensaio de corte na amostra é realizada a compactação Proctor (pesado em molde grande) para permitir a extração de provetes de solo compactado a usar no ensaio de corte.

Uma vez concluída a compactação do provete, importa recolher os provetes para a realização do ensaio. Para o efeito, coloca-se o amostrador sobre o provete compactado, contido no molde (fig. 38.a) e de seguida, sobre o amostrador, uma placa metálica com a finalidade de pressioná-lo aquando do processo da extração do provete de corte a partir do provete de compactação do molde Proctor (fig. 38.b). Enquanto o macaco hidráulico do extrator faz subir o molde, a placa faz com que o amostrador, com as dimensões internas iguais às da caixa de corte, crave no provete (fig. 38.c) permitindo, deste modo, a colheita do provete e sua transferência para a caixa de corte (fig. 38.d).

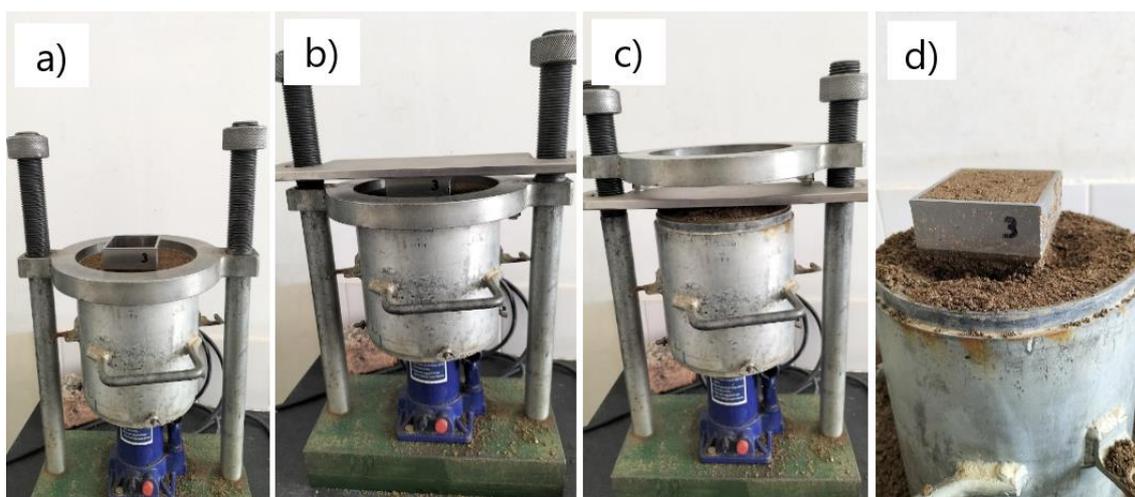


Figura 38. Cravação do amostrador e remoção do provete para o ensaio de corte: a) amostrador sobre o provete; b) placa metálica sobre o amostrador; c) cravação do amostrador; d) amostrador cravado

Após a cravação do amostrador e remoção do provete, com recurso a uma espátula, rasoira-se o provete (fig. 39.a) e determina-se a massa do provete por pesagem do conjunto extrator (amostrador) + provete (conhecendo-se previamente o valor da massa do extrator). A seguir, transfere-se o provete para a caixa de corte (fig. 39.b) e leva-se à máquina para execução do corte.

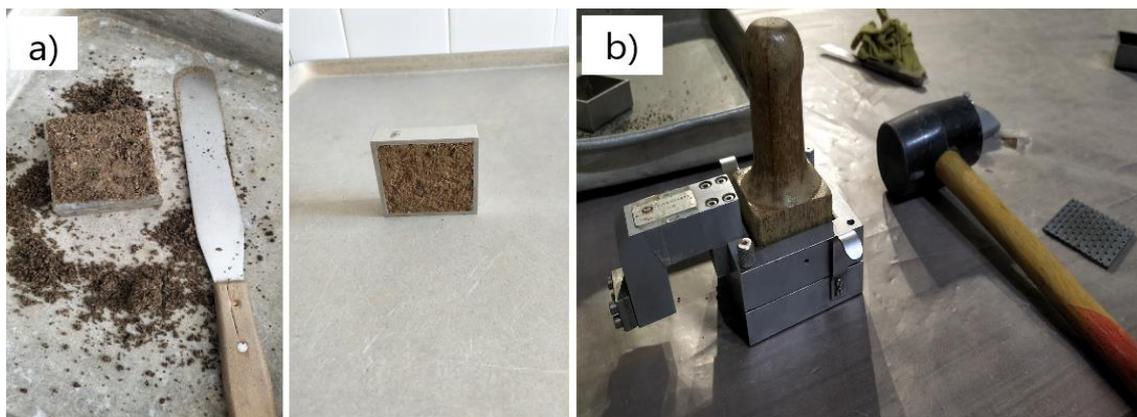


Figura 39. Transferência do provete, do amostrador para a caixa de corte: a) provete rasoirado; b) caixa de corte com o provete

Com a caixa contendo o provete já colocados na máquina de corte, coloca-se a carga sobre o provete e ajustam-se os defletómetros, para a leitura das deformações verticais e para a força de corte. Seguidamente, após estabilização do provete, aciona-se a máquina, que passa a realizar o ensaio a uma velocidade de 1 mm/min e efetuam-se as leituras, de 20 em 20 segundos, até aos 13 min. Anotam-se as deformações verticais e a força de corte (fig. 40). Depois de finalizado o ensaio, retira-se o provete da caixa e utiliza-se parte do mesmo para a determinação do teor em água.



Figura 40. Realização do ensaio de corte

Este procedimento é repetido para mais dois provetes sujeitos a diferentes valores de tensão vertical instalada durante o ensaio de corte.

3.3.6.3. Projeção de dados obtidos

Após a finalização do ensaio, projetam-se os gráficos de cada provete de corte, onde em ordenadas, se registam os valores da tensão de corte e em abcissas, os valores de deslocamento imposto a metade da caixa de corte. O valor da tensão de corte, corresponde ao maior valor obtido, que ocorre aquando da rotura do provete.

Com estes dados projetados é então possível determinar o valor correspondente à tensão de rotura de cada um dos provetes, ensaiados em condições distintas de carregamento vertical.

A seguir, projetam-se noutra gráfico (tensão de corte versus tensão vertical) o valor da tensão de rotura de cada um dos três provetes. Com base nesses três pontos é então possível definir a reta de melhor ajuste, a qual nos permitirá então determinar os valores de coesão e ângulo de atrito do solo, nas condições em que este foi compactado.

O valor da coesão corresponde à interseção da reta no eixo dos Y e o valor do ângulo de atrito corresponde à inclinação da reta traçada, baseado no critério de Mohr-Coulomb apresentado por Head (1994) e Caputo (1988) conforme ilustra a figura 41.

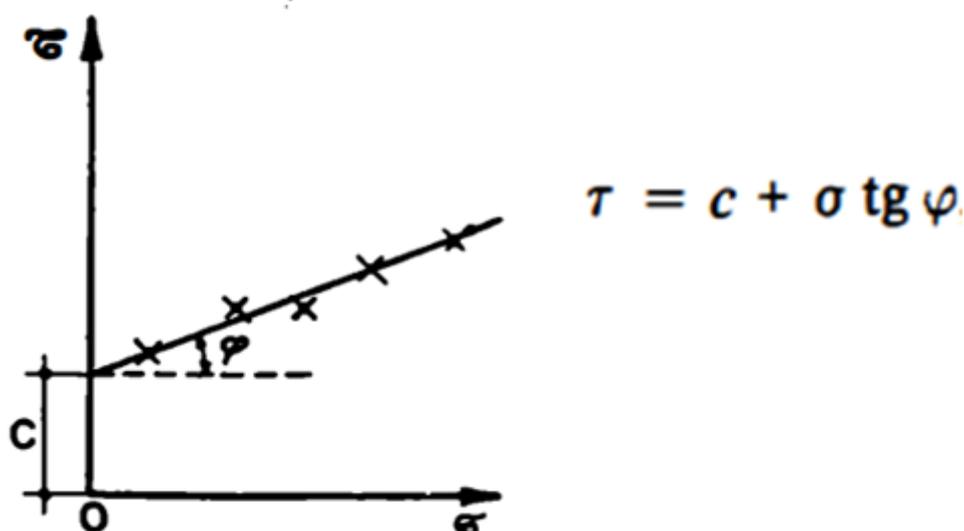


Figura 41. Determinação da coesão (c) e ângulo de atrito (φ): τ – resistência ao cisalhamento; δ – tensão de corte; σ – tensão normal (adaptado de Caputo, 1988)

CAPÍTULO 4: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados dos ensaios obtidos no âmbito dos trabalhos realizados em laboratório, ensaios de identificação (análise granulométrica e limites de consistência (LL e LL)) para propósitos de classificação de amostras, de compactação do tipo Proctor para a determinação do teor em água ótimo (W_{opt}) e respetiva baridade seca teórica máxima ($\gamma_s máx$). Apresentam-se igualmente resultados dos ensaios referentes à compressão uniaxial, ao punçoamento e ao corte direto, realizados em provetes de solo compactados.

Todos os ensaios referidos foram executados num conjunto de 3 amostras, referenciadas com a letra A (A1, A2 e A3). Com um segundo conjunto de amostras existentes na litoteca do Departamento de Geociências, colhidas e parcialmente estudadas por José Serrão (como é referido no capítulo 3, no ponto 3.1), anterior aluno do mestrado em Engenharia Geológica, referenciadas com a letra Z (Z1, Z2 e Z3), realizaram-se somente os ensaios de determinação das resistências à compressão uniaxial e ao punçoamento.

4.1. Teor em água no estado natural

Após receção e antes da execução de qualquer ensaio laboratorial mencionado acima, em cada uma das amostras da série A, tomaram-se algumas porções de solo para a determinação do seu teor em água no estado natural (de acordo com a norma NP-84-1965), conforme é descrito no capítulo 3 (no ponto 3.3.1). Procedeu-se do mesmo modo no caso das amostras da Série Z, embora neste caso o valor do teor em água determinado não seja o natural, mas sim o que estes solos detinham nesta altura. Desta determinação, obtiveram-se os valores dos teores em água seguintes (tabelas 2 e 3):

Tabela 2. Teor em água no estado natural médio, do conjunto de amostras A

Amostra	Teor em água (%)
A1	5,55
A2	5,29
A3	4,11

Tabela 3. Teor em água no estado natural médio, do conjunto de amostras Z (Serrão, 2018)

Nº DA AMOSTRA	Z1	Z2	Z3
Teor em água (%)	5,49	2,14	2,74

4.2. Ensaios de identificação e classificação de amostras

A seguir apresentam-se os ensaios de identificação, isto é, a análise granulométrica (de acordo com a E 239-1970), os limites de Atterberg ou de consistência (determinados de acordo com a NP-143-1969). Com base nos valores obtidos, procedeu-se ainda à classificação dos solos considerando as principais classificações para fins de engenharia.

4.2.1. Análise granulométrica

Tal como é descrito no capítulo 3, a distribuição granulométrica das amostras em estudo, foi realizada por peneiração, através de uma sequência de peneiros ASTM (10, 20, 40, 60, 140 e 200) e os resultados apresentam-se em tabelas, para a discriminação das frações granulares, e em gráficos, para a visualização da curva e seu comportamento:

Tabela 4. Resultados da peneiração da amostra A1³

Peneiro		Retido	Ret. Ac.	Passa. Ac.
ASTM	(mm)	(%)	(%)	(%)
4	4,750	0,00	0,00	100,00
10	2,000	11,94	11,94	88,06
20	0,850	26,50	38,44	61,56
40	0,425	18,75	57,19	42,81
60	0,250	10,68	67,87	32,13
140	0,106	14,74	82,61	17,39
200	0,075	2,87	85,48	14,52

³ O par de cores representa as percentagens dos grãos que se enquadram na escala apresentada na especificação E 196-1966 (areia fina (0,06 a 0,2 mm), areia média (0,2 a 0,6 mm) e areia grossa (0,6 a 2,0 mm)).

Tabela 5. Resultados da peneiração da amostra A2

Peneiro		Retido	Ret. Ac.	Passa. Ac.
ASTM	(mm)	(%)	(%)	(%)
4	4,750	0,00	0,00	100,00
10	2,000	6,86	6,86	93,14
20	0,850	25,63	32,49	67,51
40	0,425	22,08	54,57	45,43
60	0,250	13,52	68,09	31,91
140	0,106	18,13	86,22	13,78
200	0,075	2,09	88,31	11,69

Tabela 6. Resultados da peneiração da amostra A3

Peneiro		Retido	Ret. Ac.	Passa. Ac.
ASTM	(mm)	(%)	(%)	(%)
4	4,750	0,00	0,00	100,00
10	2,000	10,70	10,70	89,30
20	0,850	31,41	42,11	57,90
40	0,425	18,84	60,95	39,06
60	0,250	10,90	71,85	28,16
140	0,106	12,64	84,49	15,51
200	0,075	2,49	86,98	13,03

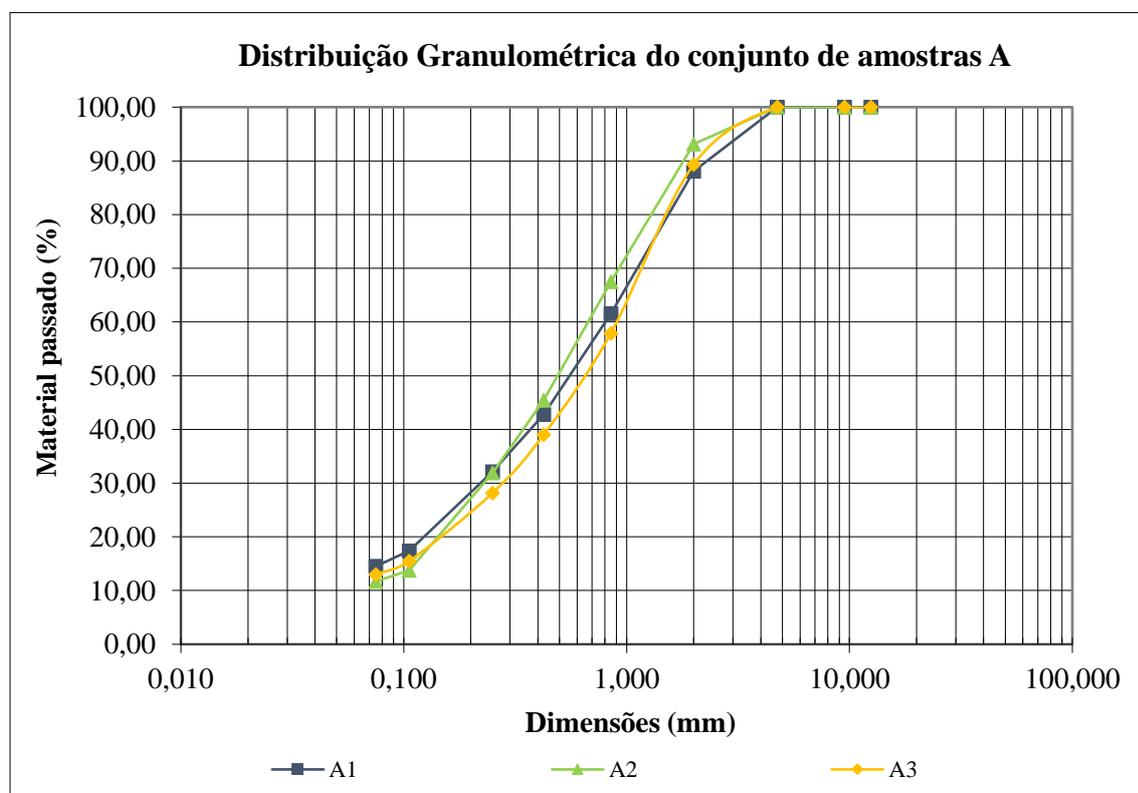


Figura 42. Curvas granulométricas das amostras A1, A2 e A3

Conforme se observa acima, no gráfico e nas tabelas acima, percebe-se que a distribuição granulométrica das 3 amostras é semelhante. Na separação da amostra pelos diversos calibres, há material que é retido num determinado peneiro e que passa noutro que o precede, na referida sequência. De acordo com estes dados, pode-se distinguir dois grupos de frações granulares retidas, primeiro, em maior expressão, segundo a especificação do LNEC E 196-1966, um grupo de partículas cujas dimensões variam entre 0,06 e 2,00 mm e que corresponde a areia. Este grupo de partículas representa 73,54% para a amostra A1, 81,86% para a A2 e 76,28% para a A3.

Dessa mesma areia, para a amostra A1, 17,61% corresponde a areia fina, 29,43% a areia média e 26,50%, a grossa. Para a amostra A2, 20,22% é fina, 35,60% é média e 25,63% corresponde a areia grossa. E, para a amostra A3, 15,13% é areia fina, 29,74% é média e 10,70% é grossa.

Tendo em conta a classificação granulométrica e a fração que está em maior percentagem nas amostras, nota-se claramente que ambas as amostras deste conjunto correspondem a areias médias.

O segundo grupo que corresponde a siltes e argilas é, segundo a especificação do LNEC E 239-1970, material de diâmetro equivalente inferior a 0,074 mm que se deposita no fundo e que para a A1, corresponde a 14,52%, para a A2 e A3, 11,69% e 13,03%, respetivamente.

Embora a diferença seja muito pequena, é importante notar que as amostras A1 e A3 apesar de corresponderem a areias médias, detêm maior percentagem de finos (partículas de dimensão inferior a 0,074 mm) em comparação com a amostra A2.

Pelo gráfico (fig. 43), segundo Serrão (2018):

“O solo Z1 e o solo Z2 enquadram-se num solo do tipo areia média e o solo Z3, numa areia fina a média. As distribuições granulométricas das amostras Z1, Z2 e Z3 são muito semelhantes apresentando uma distribuição típica de solos arenosos.”

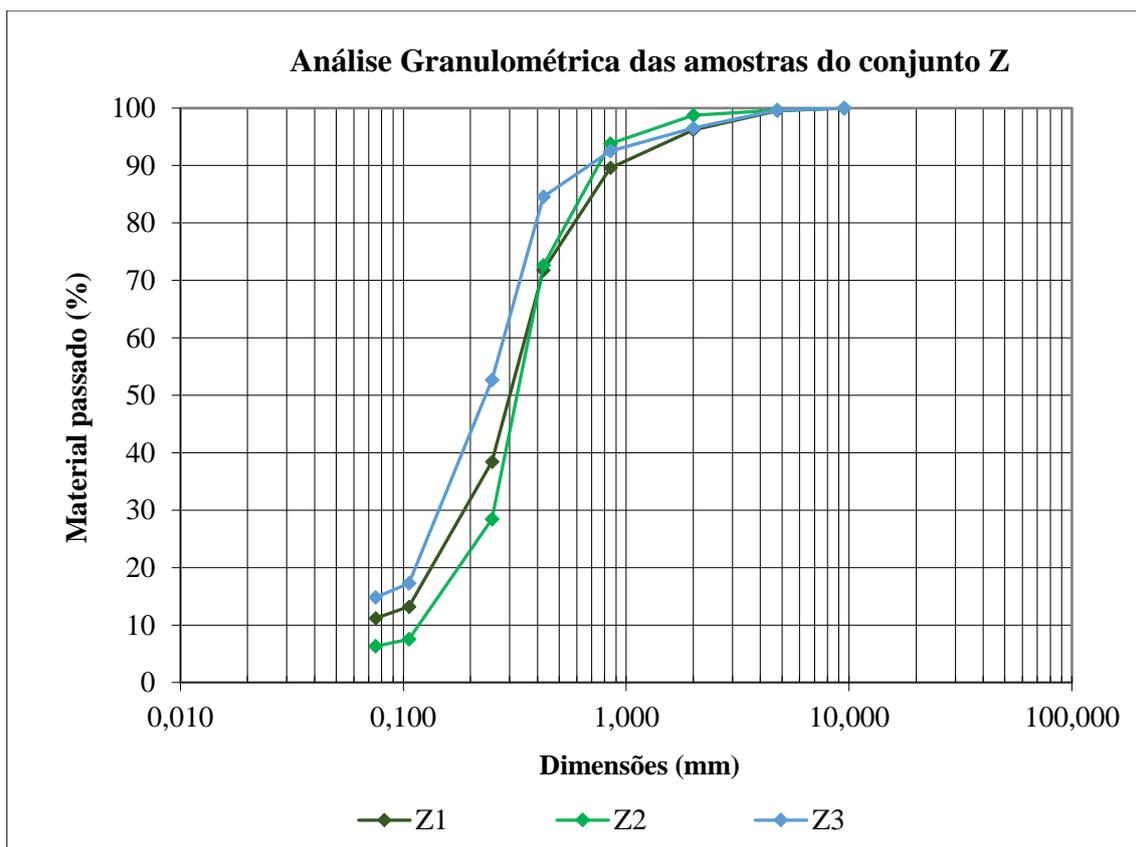


Figura 43. Curvas granulométricas das amostras Z1, Z2 e Z3 (excerto de Serrão, 2018)

Comparando-se os gráficos, realmente, percebe-se que o comportamento das amostras é semelhante e típico de solos arenosos.

4.2.2. Limites de consistência ou Atterberg

Ainda no contexto dos ensaios de identificação e no sentido de se perceber o comportamento dos solos em estudo, foram determinados os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) das amostras, de acordo com a NP-143-1969.

A determinação do limite de liquidez (fig. 44) foi efetuada com a concha de Casagrande, conforme é referido no capítulo anterior (no ponto 3.3.3.1.2). No entanto, para o conjunto de amostras A, a determinação só foi possível nas amostras A1 e A3. E, de acordo com Serrão (2018), em nenhuma das amostras do conjunto Z foi possível determinar o limite de liquidez.

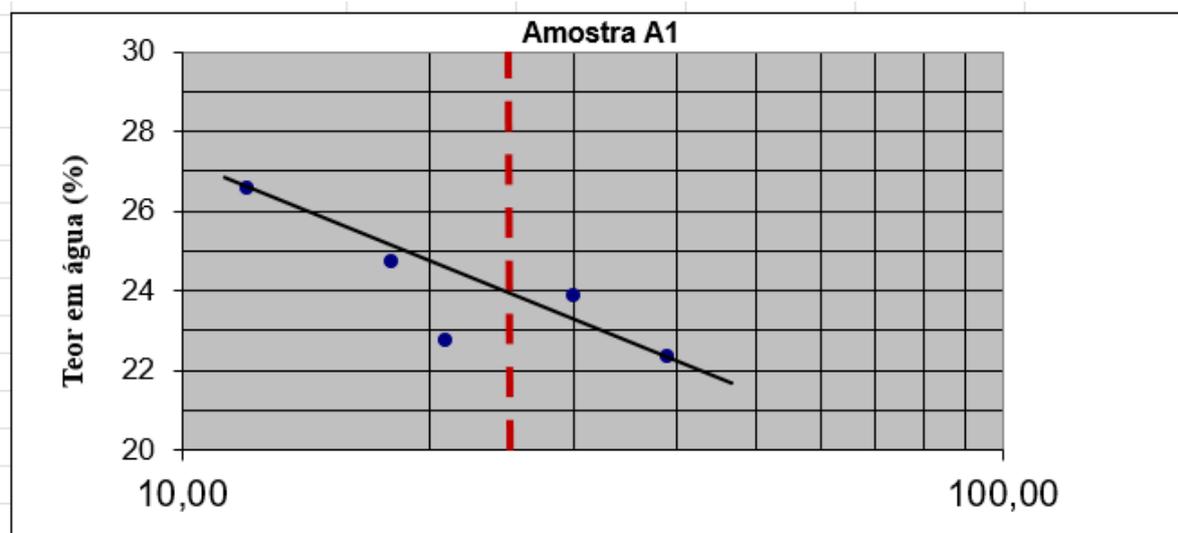


Figura 44. Gráfico exemplo usado para determinação do valor do LL por interpolação da amostra A1

A determinação do limite de plasticidade foi executada numa placa de vidro conforme é explicado no capítulo anterior (no ponto 3.3.3.2.2). No entanto, tal como aconteceu na determinação do valor do LL, só foi possível determiná-lo na amostra A1, não tendo sido conseguido nas restantes duas do conjunto A de amostras, isto é, A2 e A3. De acordo com Serrão (2018), não foi possível determinar o valor do LP para nenhuma das amostras do conjunto Z (Z1, Z2 e Z3).

A não determinação de um ou outro limite aqui tratado, resulta na não determinação do índice de plasticidade (IP). A seguir apresenta-se um quadro resumo (tabela 7) a informação relativa a estas determinações, com a designação da amostra, bem como, em qual destas foi possível determinar estes parâmetros.

Tabela 7. Quadro resumo da determinação dos limites de consistência

Amostra	LL	LP	IP
A1	24	21	3
A2	NR / NP	NR / NP	-
A3	25	NP / NP	-
Z1	NR / NP	NR / NP	-
Z2	NR / NP	NR / NP	-
Z3	NR / NP	NR / NP	-

*NR = Não realizável; NP = Não plástico

A norma utilizada para esta determinação limita-se apenas a considerar se o material ensaiado é ou não plástico, sendo “plástico” quando se consegue realizar o ensaio e “não plástico” quando não se consegue. Assim, para se estabelecer o grau de plasticidade que uma amostra de solo possui, pode-se observar a classificação proposta por Jenkins (1988) Cit. por Serrão (2018), através do índice de plasticidade (IP), quando este, para um determinado solo, é igual ou superior a zero. Por essa via, é somente na amostra A1 (tabela 8) que se conseguiu determinar o grau de plasticidade, por ter apresentado valor (IP = 3).

Tabela 8. Classificação das amostras (conjunto de amostras A e Z) segundo proposta de Jenkins (1988) Cit. por Serrão (2018)

Classificação	IP (%)	A1	A2	A3	Z1	Z2	Z3
Não plástico	IP=0						
Pouco plástico	1<IP<7	✓					
Mediamente plástico	7<IP<15						
Muito plástico	IP>15						

De facto, todas as amostras, excetuando a A1 que é pouco plástica, são consideradas não plásticas por não se ter conseguido determinar ou o valor do LL e/ou de LP, com os métodos utilizados e descritos anteriormente.

De acordo com Serrão (2018), a razão de não se ter conseguido determinar os valores do LL ou LP nas amostras da série Z, deveu-se ao facto destes solos serem estritamente arenosos.

Os valores dos limites de consistência obtidos para as amostras testadas, são certamente influenciados pela percentagem em argila contida nestas amostras, correspondente à fração cujas partículas têm dimensão inferior a 0,002 mm e pela sua composição em minerais argilosos. Esta observação tem em conta um estudo realizado pelos autores Luciano et., al (2012) onde os seus valores de limites de consistência, isto é, o limite de liquidez e o de plasticidade, aumentaram com o aumento do teor de argila e reduziram com o aumento dos teores de areia fina e total.

Veja-se que enquanto por um lado, a fração dos finos (que corresponde a argilas e siltes) registada na amostra A2 foi de 11,69%, 13,03% na amostra A3 e 14,52% na amostra A1, por outro lado, os teores de areia fina e total registados nestas amostras foram, respetivamente, 73,54%, 81,86% e 76,28%, ou seja, é justamente na amostra A1 onde a fração dos finos é superior onde que se conseguiu determinar os limites de consistência, ao contrário do que aconteceu nas restantes, onde esta fração é relativamente inferior. Ainda assim, mais dados

seriam necessários para tirar esta conclusão, nomeadamente a determinação da percentagem de argila (partículas de dimensão $< 0,002$ mm) presente em cada amostra bem como a determinação dos minerais argilosos presentes na referida fração por DRX (Difração por raio-X).

4.2.3. Classificação para fins de engenharia

Com os dados resultantes dos ensaios de identificação dos solos, é então possível proceder a sua classificação, o que se efetuou, de acordo com três sistemas de classificação mais utilizados para fins de engenharia:

- Classificação de solos para fins rodoviários – LNEC E240 - 1970
- Sistema Unificado de Classificação dos Solos (S.U.C.S.) – ASTM D 2487 – 85
- Classificação de solos francesa - LCPC / SETRA / GTR - NF P 11 300

Na tabela 9 seguinte apresentam-se as classificações dos solos correspondentes às amostras do conjunto A:

Tabela 9. Classificação das amostras A1, A2 e A3 segundo 3 sistemas de classificação

AMOSTRA	Classificação para fins rodoviários	S.U.C.S.	GTR
A1	A-1-b (0)	SM – Areia siltosa	(D1, B1, B2 ou B5)*
A2	A-1-b (0)	SP-SM – Areia mal graduada com silte	(D1, B1 ou B2)*
A3	A-1-b (0)	SM – Areia siltosa	(D1, B1, B2 ou B5)*

* Os solos pertencem a um dos grupos assinalados, no entanto não foi possível determinar a qual deles pertence devido ao não conhecimento do valor de VMS (Azul de metileno).

Relativamente aos solos do conjunto Z, apresenta-se abaixo um excerto dos resultados apresentados por Serrão, 2018:

Tabela 10. Classificação das amostras Z1, Z2 e Z3 segundo 3 sistemas de classificação (excerto de Serrão, 2018)

Amostra/Classificação	LNEC – E240	SUCS	LCPC/SETRA
Z1	A-2-4(0)	SP-SM (Areia bem graduada com silte)	(D1 ou B1 ou B2)*
Z2	A-3(0)	SP-SM (Areia mal graduada com silte)	(D1 ou B1 ou B2)*
Z3	A-2-4(0)	SM (Areia siltosa)	(B5 – B6)*

* Os solos pertencem a um dos grupos assinalados, no entanto não foi possível determinar a qual deles pertence devido ao não conhecimento do valor de VMS (Azul de metileno).

4.3. Ensaio de Compactação Proctor

O ensaio de compactação Proctor foi conduzido em conformidade com a especificação E 197-1966, como é descrito no capítulo anterior (no ponto 3.3.4). Foi realizado no sentido de se determinar o teor em água ótimo de compactação e respetiva baridade seca teórica máxima ($\gamma_{s\text{ máx}}$), que se consegue projetando os dados de cada provete de mesma amostra num gráfico, registando em abcissas, o teor em água de cada provete no momento da compactação e em ordenadas, o correspondente valor da baridade seca. Os valores da baridade máxima teórica e respetivo teor em água ótimo de compactação correspondem ao ponto de inflexão da curva que une os pontos projetados como é ilustrado na figura 45 abaixo.

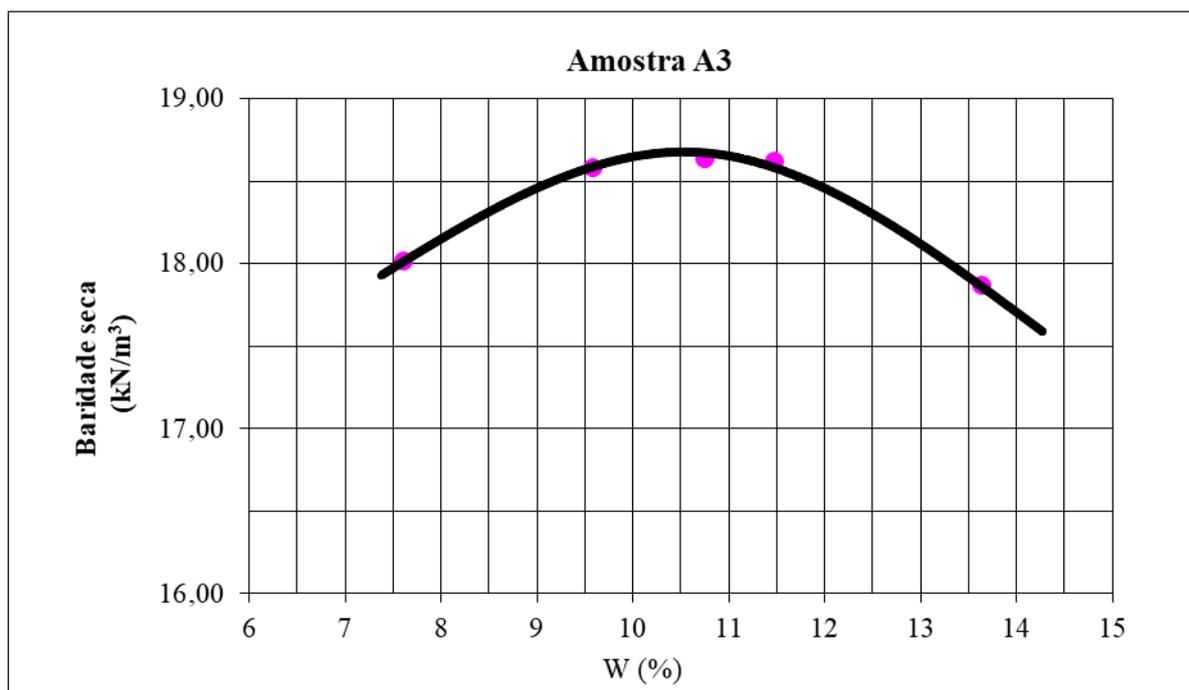


Figura 45. Curva de compactação: teor em água versus baridade máxima teórica da amostra A3

A seguir, são então apresentados os teores em água ótimos e a baridade máxima teórica das amostras, determinados através desta técnica de projeção e visualização da curva de compactação. Na tabela 11, constam os dados obtidos em laboratório realizados pelo autor, referentes a amostras A1, A2 e A3 e na tabela 12, constam os dados relativos às amostras Z1, Z2 e Z3, coligidos pelo autor e obtidos pelo antigo aluno de mestrado como é dito anteriormente e constantemente referido neste trabalho.

Tabela 11. Resultados da compactação Proctor, para as amostras A

Amostra	Baridade seca máxima (kN/m ³)	Teor em água ótimo (%)
A1	18,54	9,03
A2	18,43	8,83
A3	18,63	11,26

Tabela 12. Resultados da compactação Proctor para as amostras Z. Dados coligidos (Serrão, 2018)

Amostra	Baridade seca máxima (kN/m ³)	Teor em água ótimo (%)
Z1	19,12	6,50
Z2	16,97	13,00
Z3	17,36	11,50

Por um lado, pelos resultados apresentados acima, percebe-se que as baridades secas máximas teóricas das amostras A1, A2 e A3, praticamente não diferem entre si, o que se explica pelas características granulométricas similares que partilham. Por outro lado, quanto ao conjunto Z, nota-se alguma diferença entre os valores da baridade seca apresentadas pelas amostras Z1, Z2 e Z3, sendo esta diferença muito mais notável na amostra Z1 cujo valor é o mais elevado comparativamente aos demais, incluindo os valores do conjunto de amostras A.

No geral, comparando as amostras percebe-se que as amostras do conjunto A (A1, A2 e A3) apresentaram valores relativamente mais altos do que das amostras do conjunto Z, excetuando a amostra Z1, que apresenta um valor de baridade seca mais elevado de todos como se referiu anteriormente. Ainda assim, os valores do teor em água de compactação, bem como, os da baridade seca máxima teórica encontram-se dentro dos valores expectáveis, estabelecidos e apresentados, por exemplo, por Trindade et., al (2003) para os solos arenosos.

No que toca às características físicas intrínsecas dos solos, a mineralogia, dimensão e forma das partículas, bem como, densidade relativa das partículas que o constituem, são determinantes para explicar as semelhanças e/ou diferenças dos resultados obtidos. Apesar de não ter sido realizada a determinação da mineralogia, forma e densidade das partículas dessas amostras, é de se esperar que estes parâmetros exerçam alguma influência, tal como explica Faria (2005):

“Os valores dos parâmetros de compactação determinados dependem da distribuição granulométrica das partículas que o constituem, e da composição mineralógica da sua fração fina.

A distribuição granulométrica determina a “estrutura” do solo e conseqüentemente condiciona a existência de vazios, e a composição mineralógica, é determinante na capacidade de retenção de água por parte do solo e, conseqüentemente, no seu comportamento face ao teor de humidade.”

4.4. Resistência versus teor em água

A compactação de um solo, de acordo com Caputo (1988) “visa reduzir o volume de seus vazios e, assim, aumentar sua resistência, tornando-o mais estável”.

Realizou-se trabalho laboratorial no intuito de estabelecer a relação “resistência versus teor em água de compactação”, à compressão uniaxial, ao punçoamento e ao corte direto, em solos compactados.

A seguir faz-se uma análise individual destas resistências.

4.4.1. Compressão uniaxial (simples)

Tal como é referido anteriormente, no capítulo 3 (no ponto 3.3.5), após compactação e determinação do teor em água ótimo, realizaram-se ensaios de compressão uniaxial tanto nas amostras do conjunto A (A1, A2 e A3), como nas do conjunto Z (Z1, Z2 e Z3) com base nas normas NP 1926-2008, NP 12390-2009 e a especificação do LNEC 264-1972.

Nos gráficos em que se apresentam os resultados, a cor corresponde ao teor em água de compactação (em %) com que cada provete foi compactado e ensaiado, sendo que os pontos a laranja correspondem a provetes compactados com os teores em água inferiores ao ótimo, pontos a azul, correspondentes aos teores em água próximos do ótimo e os pontos a cinzento, refletem provetes compactados com teores água superiores ao ótimo de compactação. Nestes gráficos o teor em água (em %) regista-se em abcissas e resistência à compressão simples (em kPa) em ordenadas.

Para cada uma das amostras referidas acima, vários provetes de solos, compactados com diferentes teores em água, foram levados à prensa de compressão para esta determinação. Decorrente destas determinações, obtiveram-se os seguintes resultados (fig. 46, 47 e 48):

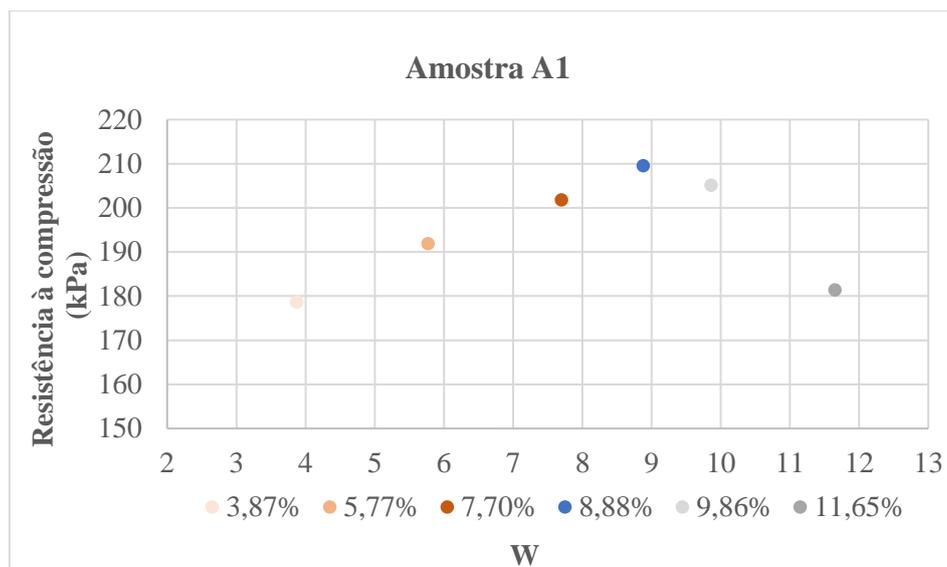


Figura 46. Projeção de resultados da compressão uniaxial de provetes da amostra A1

Com base no gráfico acima apresentado (fig. 46), nota-se que a evolução dos valores obtidos, para provetes compactados com diferentes teores em água, tem um comportamento parecido com o verificado na compactação Proctor. Veja-se que para os provetes compactados com um teor em água entre 3,87 e 8,88%, ou seja, inferiores ao ótimo, a resistência aumenta de 178,64 para 209,52 kPa, reduzindo de 209,52 kPa para 181,39 kPa no caso dos provetes com teor em água entre 8,88 e 11,65%, teores em água superiores ao ótimo. Assim, a linha de tendência da variação da resistência à compressão uniaxial com a variação do teor em água, acompanha a linha de tendência da variação da baridade seca com a variação do teor em água do solo. O valor de baridade mais elevada obtida ($\gamma_s \text{ máx}$) foi de 209,52 kPa, no provete compactado com teor em água de compactação próximo do ótimo.

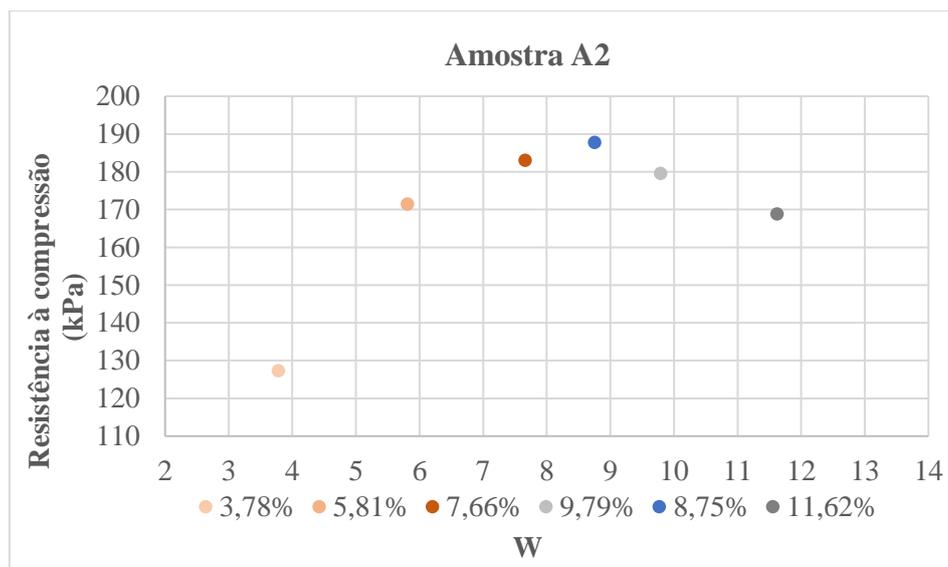


Figura 47. *Projeção de resultados da compressão uniaxial de provetes da amostra A2*

Tal como no gráfico anterior, no gráfico correspondente à projeção dos resultados relativos aos ensaios realizados na amostra A2 (fig. 47) também se observa que a projeção dos valores obtidos conduz ao traçado de uma curva com forma semelhante à curva do ensaio de compactação Proctor. Assim, à medida que o humedecimento dos solos aumenta até o seu teor em água próximo do ótimo de compactação (teores em água crescentes até 8,75%), a resistência aumenta de 127,37 para 187,77 kPa e, por outro lado, a resistência diminui de 187,77 para 168,86 kPa, com o aumento do teor em água, a partir do teor ótimo de compactação. Verifica-se que o valor máximo da resistência à compressão simples corresponde, também neste caso, à compactação máxima obtida do solo.

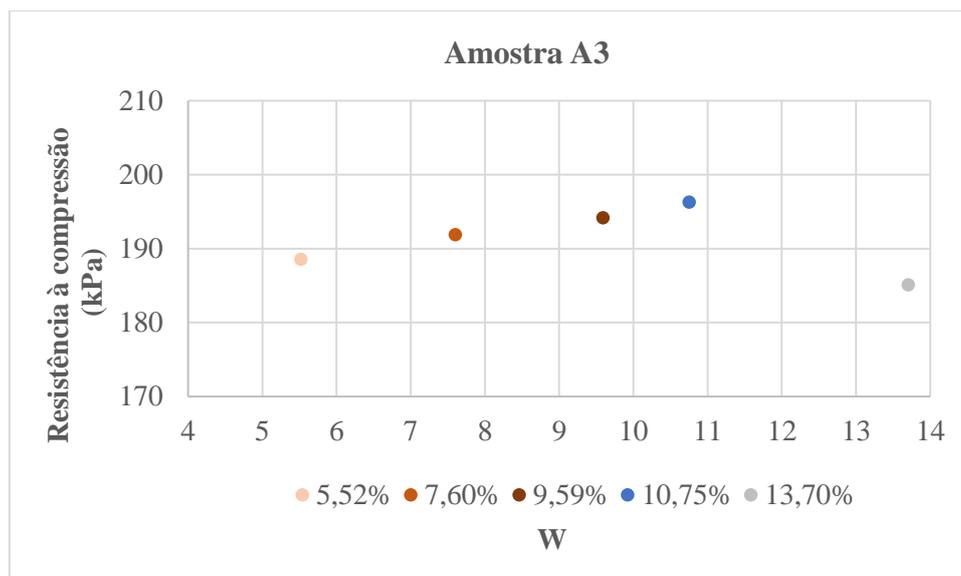


Figura 48. Projeção de resultados da compressão uniaxial de provetes da amostra A3

Da mesma forma, para o caso da amostra A3, nota-se que o comportamento verificado nos outros dois gráficos anteriores (fig. 47 e 48) é também observado no gráfico resultante da projeção dos resultados desta amostra (fig. 49). Atendendo à natureza da curva, é fácil perceber o sentido do incremento e de decréscimo da resistência. Para provetes compactados com teores em água entre 5,52% e 10,75%, a resistência aumenta, de 188,57 para 196,29 kPa, enquanto entre 10,75% e 13,70% de teor em água, a resistência reduz, diminuindo de 196,29 para 185,10 kPa. Também neste caso da amostra A3, o valor da resistência à compressão uniaxial é máximo quando a compactação do solo se processa com o teor em água ótimo obtido no ensaio Proctor.

Nota-se perfeitamente o incremento da resistência à compressão uniaxial destes materiais com o aumento do teor em água de compactação até perto da região onde se situa o teor ótimo, diminuindo a partir daí com a continuação do aumento da humidade do solo, concordando deste modo com o que constata Couto (2018), para os estudos realizados com solos tratados.

Por outro lado, os valores anteriormente apresentados contrariam o referido por Faria (2007), uma vez que no seu trabalho generaliza que a resistência à compressão simples dos solos decresce sempre com o aumento do teor em água. Esta observação permite considerar que para além do teor em água de compactação, outras características próprias do solo influenciam o resultado, como referido por vários autores, nomeadamente, Caputo (1988), Murthy (2002), Budhu (2010), Faria (2005), entre outros.

Relativamente às amostras de solos da série Z, foi executado o mesmo procedimento, mas não foi possível obter resultados. Aquando da realização dos ensaios de compressão, nos provetes compactados com diversos teores em água, verificava-se a sua rotura sem possibilidade de registo de dados na prensa. Deste modo, percebemos que a sensibilidade da prensa usada não será suficiente para captar os registos de rotura destes solos, que serão seguramente bastante inferiores aos obtidos para os provetes testados das amostras da série A.

Por outro lado, os solos do grupo Z são solos de granulometria pouco extensa, tendendo para uma distribuição de calibres do tipo monogranular (no sentido em que a maior parte das partículas se concentram numa gama apertada de dimensões), ou seja, são solos mais difíceis de compactar que permitem a existência de algum índice de vazios na sua estrutura. Se para além desse facto a fração correspondente às argilas for muito baixa e/ou não existirem minerais de argila suficientes, a coesão entre partículas será muito fraca e, conseqüentemente o provete compactado será menos resistente à ação de compressão da prensa.

Observou-se durante os ensaios que ao carregar os provetes do conjunto Z, estes se desfaziam completamente, com bastante facilidade (fig. 49)⁴, sem que a prensa chegasse a conseguir registar a tensão instalada. Já no caso dos provetes ensaiados representativos das amostras do conjunto A (fig. 50), é possível perceber a rotura do provete, bem como novos incrementos e roturas sucessivas, decorrentes dos rearranjos que se foram construindo à medida que se dava o carregamento do provete. Esta situação também dificulta a definição do momento exato da primeira rotura do provete (fig. 51).

⁴ Para garantir que os provetes não se desfizessem dentro da prensa, a prensa teve de ser parada.



Figura 49. Imagem de um provete de uma das amostras do conjunto Z destruído após o início do carregamento



Figura 50. Condições de uma das amostras do conjunto A após carregamento

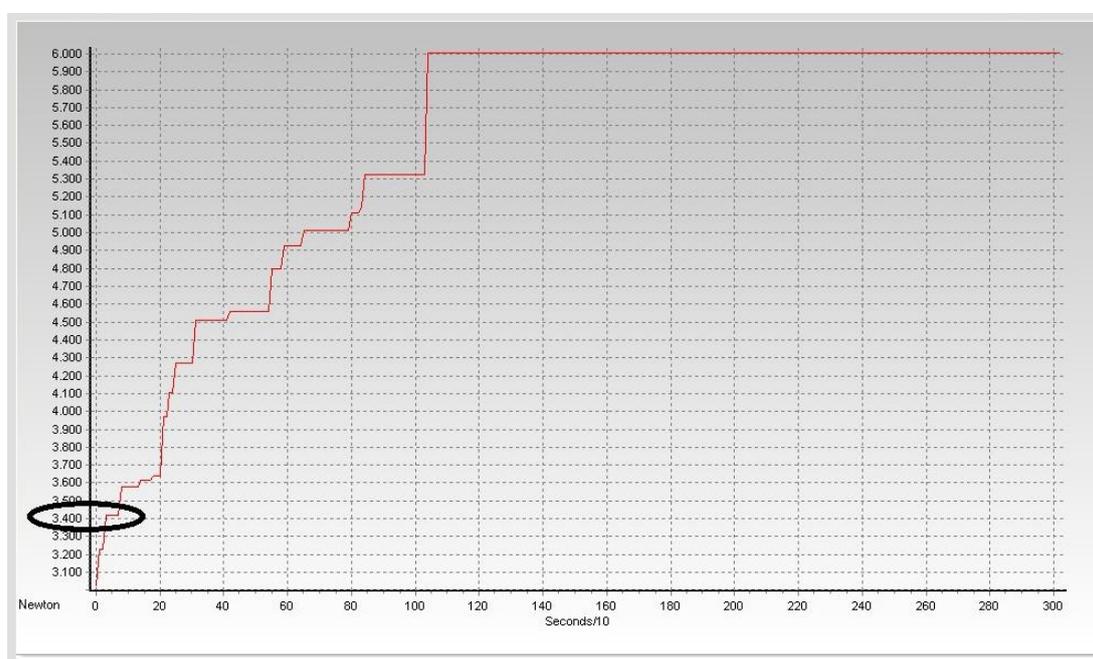


Figura 51. Definição durante o ensaio, do momento de rotura em detrimento das outras roturas secundárias

4.4.2. Punçoamento

Os aterros estão sujeitos a esforços de compressão ao longo da sua construção, mas também após a sua conclusão, dependendo desses esforços (dimensão e extensão), da razão pela qual o aterro foi construído. Por exemplo, se se tratar de um aterro incluído numa estrada, estará sujeito certamente a esforços decorrentes do tráfego da via ou de veículos estacionados, entre outros. Assim, esses esforços de compressão podem corresponder ao punçoamento, caso a área de transmissão da força aplicada seja suficientemente pequena, para que se possa considerar pontual.

Para estabelecer a influência que o teor em água tem na resistência ao punçoamento dos solos, após conhecimento do seu teor em água ótimo de compactação, mediante a realização do ensaio de compactação do tipo Proctor, como é explicado no capítulo 3 (no ponto 3.3.4), três provetes foram compactados, contendo diferentes valores do teor em água. Um dos provetes foi previamente humedecido de modo a ter o teor em água ótimo e os outros dois, com menos e mais teor em água, relativamente ao ótimo, com uma diferença de aproximadamente, 2%.

Depois de compactados os provetes, estes foram então sujeitos à penetração de um pistão, de modo a determinar a sua resistência ao punçoamento.

O ensaio realizou-se à semelhança do ensaio CBR, normalizado pela especificação do LNEC E 198-1967, sem, contudo, submeter os provetes a embebição como é realizado no ensaio normal de CBR, para garantir que os provetes fossem ensaiados nas mesmas condições de humidade com que são compactados.

Para cada amostra, apresenta-se um gráfico com a projeção de todas as leituras efetuadas. Porém, esta análise reserva-se, especialmente, às penetrações de 2,5 e 5,0 mm, pois são valores de força referentes a estas penetrações que são utilizadas nos cálculos no ensaio normal de CBR, embora não se tenha seguido com rigor a especificação como referido anteriormente, no capítulo 3.

Para cada ponto nos gráficos, tal como acontece nos gráficos anteriores apresentados para o caso da resistência à compressão simples, a cor utilizada na representação de cada ponto corresponde ao teor em água de compactação com que o provete foi compactado e ensaiado. Nestes gráficos a penetração (em mm) regista-se em abcissas e resistência à penetração (em kPa) em ordenadas.

Importa indicar que no caso da resistência ao punçoamento nos ensaios realizados em diferentes amostras, ao contrário do que se verificou para a resistência à compressão simples, não se observou constância na tendência de variação dos valores de resistência com a variação do teor em água de compactação dos provetes ensaiados, como se poderá confirmar na descrição que a seguir se apresenta.

Na figura 52 a seguir, apresentam-se os resultados de todas as penetrações da A1. Na tabela 13, apresentam-se os resultados relativos às penetrações de 2,5 mm e de 5 mm.

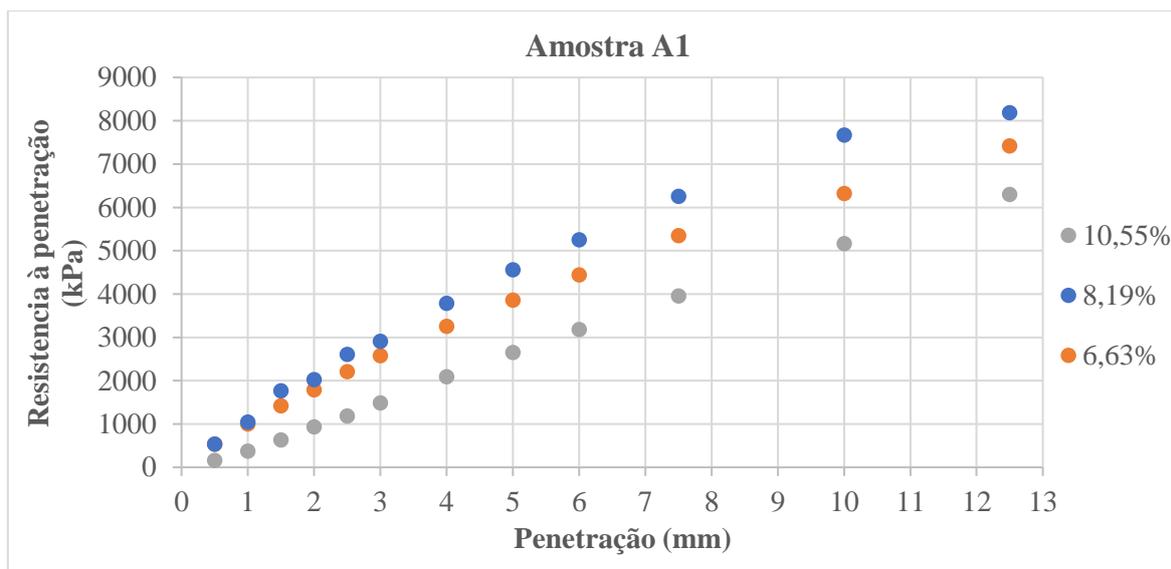


Figura 52. Resultados dos ensaios de punçoamento da amostra A1

Tabela 13. Resultados parciais do punçoamento da A1

Penetração (mm)	R (kPa)	Teor em água (%)
2,5 mm	1185,50	10,55
	2603,46	8,19
	2208,29	6,63
5,0 mm	2649,95	10,55
	4556,06	8,19
	3858,70	6,63

Pela informação projetada acima (fig. 52 e tabela 13), percebe-se, claramente que o incremento da resistência acontece com o aumento da penetração. Em relação à penetração de 2,5 mm, as resistências registadas nos provetes, para o teor em água de 6,63%, 8,19% e 10,55%, foram, respetivamente, 2208,29, 2603,46 e 1185,50 kPa. Em relação à penetração de 5,0 mm para os mesmos provetes, os valores de resistência ao punçoamento obtidos para os referidos valores de teor em água foram, respetivamente, 3859,70, 4556,06 e 2649,95 kPa. Nesta amostra, nas condições de humidade em que o ensaio foi realizado, conforme se pode observar, nota-se que o provete compactado com o teor em água próximo do ótimo (8,19%) apresenta valor de resistência superior aos obtidos para os restantes provetes nas duas penetrações. De igual modo, embora com distância relativamente próxima ao teor ótimo, o provete compactado com teor em água inferior ao ótimo (6,63%) apresenta valor de resistência superior ao provete compactado com o maior teor em água (10,55%).

Verifica-se assim que, para esta amostra A1, à semelhança do que se observou para o caso da compressão uniaxial, também no caso do punçoamento se observa que a resistência aumenta com o aumento do teor em água até que se atinge o valor da resistência mais elevada para o provete compactado com teor em água próximo do ótimo. Alcançado este valor mais elevado, o valor da resistência, diminui com o aumento do teor em água.

A comparação feita entre os dados do punçoamento e da compressão uniaxial, relativamente à sua variação em função da variação do teor em água dos provetes testados, também pode ser estabelecida do mesmo modo por comparação com os dados da compactação proctor, no que respeita à variação da baridade seca. Comparação esta, que foi anteriormente apresentada aquando da discussão dos resultados da compressão uniaxial.

Na figura 53 e tabela 14, apresentam-se os resultados obtidos para a amostra A2.

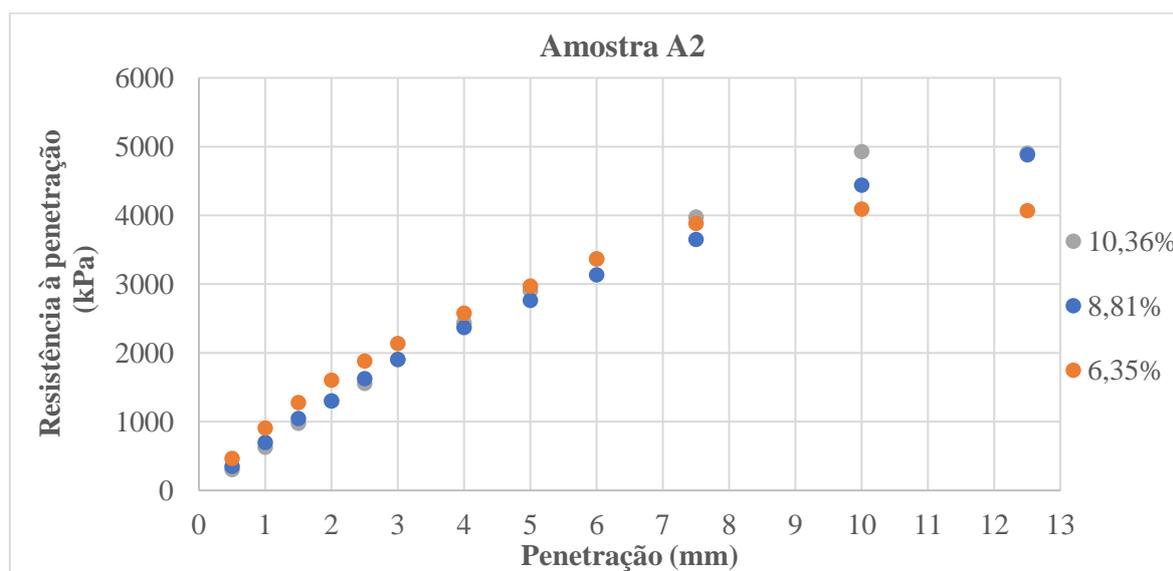


Figura 53. Resultados dos ensaios de punçoamento da amostra A2

Tabela 14. Resultados parciais do punçoamento da amostra A2

Penetração (mm)	R (kPa)	Teor em água (%)
2,5 mm	1557,43	10,36
	1627,16	8,81
	1882,86	6,35
5,0 mm	2905,65	10,36
	2766,18	8,81
	2975,38	6,35

Pela informação projetada acima, tal como acontece nos casos anteriores, a tendência de crescimento da resistência dá-se com a penetração no provete. Concernente à penetração de 2,5 mm, nota-se que o provete compactado com 6,35% de teor em água apresentou o maior valor de resistência de todos, 1882,86 kPa, seguida do provete compactado com 8,81%, com resistência de 1627,16 kPa e compactado com o teor em água superior ao ótimo (10,36%), valor de 1557,43 kPa.

Para a penetração de 5,0 mm. O provete compactado com 6,35% de teor em água, continua com o valor de resistência mais elevado de 2975,38 kPa, enquanto a resistência dos provetes compactados com 8,81% e 10,36% de teor em água, foi de 2766,55 e 2905,65 kPa, respetivamente.

Estes dados da amostra A2, comparados com os da amostra A1, mostram uma ligeira diferença na forma como evoluem os valores da resistência à penetração com o aumento do teor em água, ou seja, enquanto no caso da amostra A1 foi o provete compactado com o teor em água próximo do ótimo de compactação que se apresentou com valores de resistência superiores, nesta amostra é o provete compactado com o teor em água inferior ao ótimo (6,35%) que se apresentou com valores mais elevados.

Relativamente aos dados obtidos para a penetração de 5,0 mm, observámos que o valor correspondente ao provete compactado com maior teor de humidade, se apresenta superior ao valor obtido para o teor ótimo, estando mesmo muito próximo do valor obtido para o provete mais seco. Esta situação pode, possivelmente, ser explicada pela pressão intersticial que a água, nesse momento, poderia estar a exercer sobre o pistão, uma vez que o ensaio é realizado sobre um provete dentro do molde, unido à base, em condições de confinamento.

Contudo, a experiência vivida durante os ensaios, mostrou que, a partir de determinada altura, enquanto o pistão penetrava o provete com a subida do molde, se observava a água a escapar do molde, pela base (fig. 54), facto que certamente fez diminuir a tensão intersticial.



Figura 54. Momentos registados do escape da água do molde

Na figura 55 e tabela 15, apresentam-se os resultados obtidos para a amostra A3.

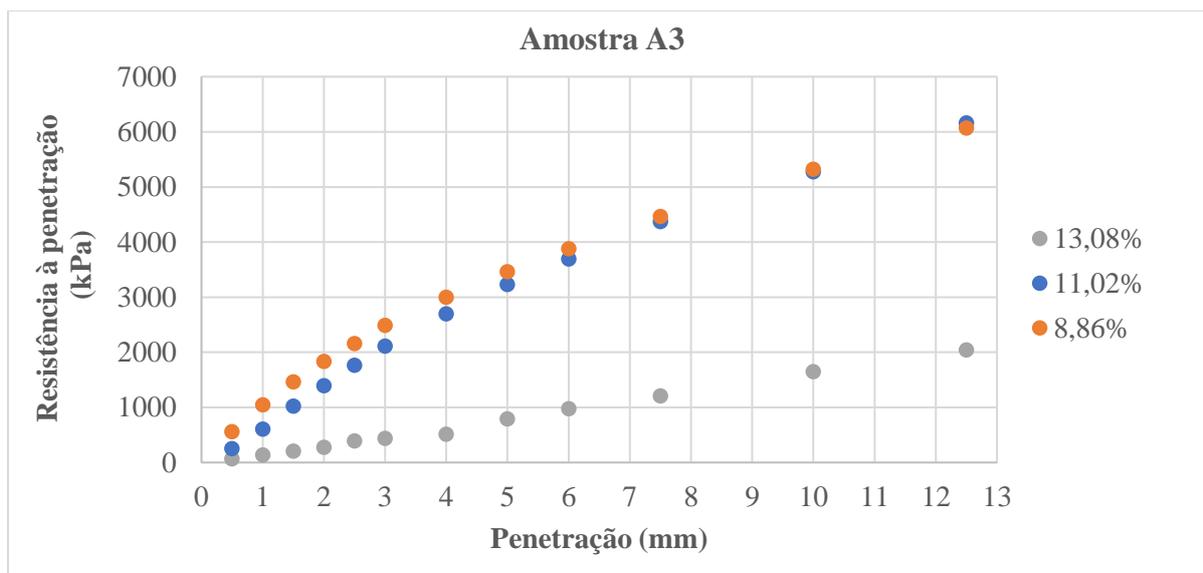


Figura 55. Resultados dos ensaios de punção da amostra A3

Tabela 15. Resultados parciais do punção da amostra A3

Penetração (mm)	R (kPa)	Teor em água (%)
2,5 mm	395,17	13,08
	1766,63	11,02
	2161,80	8,86
5,0 mm	790,34	13,08
	3231,08	11,02
	3463,53	8,86

De acordo com o gráfico e tabela acima (fig. 55 e tabela 15), tal como acontece na amostra A2, os provetes compactados com teor em água de 8,86% e 11,02% são os que registam os valores mais elevados de resistência à penetração de 2,5 mm, 2161,80 e 1766,63 kPa, respetivamente, enquanto o compactado com 13,08% de teor em água apresenta resistência de 395,17 kPa. Esta evolução vai de acordo com observado na amostra A2, para a penetração de 2,5 mm.

Relativamente à penetração de 5,0 mm, o comportamento verificado na outra penetração mantém-se. Assim, o valor registado do provete compactado com 8,86 % de teor em água foi de 3463,53 kPa, de 3231,08 kPa para o compactado com teor em água de 11,02% e 790,34 kPa para o provete compactado com 13,08% de teor em água.

Continuando esta análise sobre a resistência à penetração versus teor em água, foram igualmente testados os solos correspondentes ao conjunto de amostras Z (Z1, Z2 e Z3) cujos resultados são apresentados e discutidos a seguir.

Na figura 56 e tabela 16, apresentam-se os resultados obtidos para a amostra Z1.

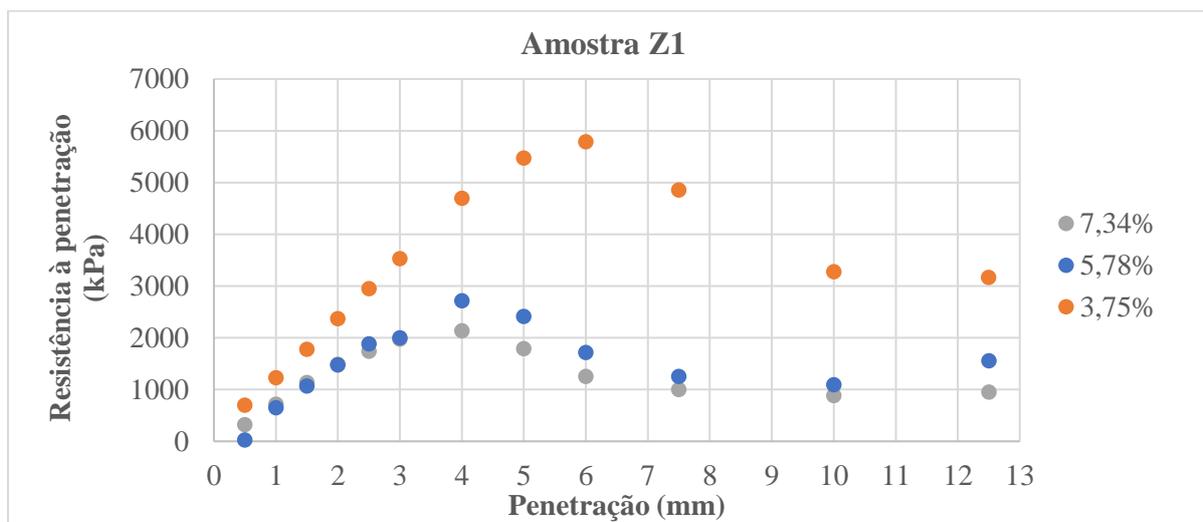


Figura 56. Resultados dos ensaios de punção da amostra Z1

Tabela 16. Resultados parciais do punção da amostra Z1

Penetração (mm)	R (kPa)	Teor em água (%)
2,5 mm	1743,39	7,34
	1882,86	5,78
	2952,14	3,75
5,0 mm	1789,88	7,34
	2417,50	5,78
	5474,24	3,75

Os valores da resistência do provete compactado com teor em água de 3,75% diferem, substancialmente, dos outros registados nos outros provetes. Nota-se no gráfico que após se atingir as resistências máximas, os valores da resistência dos provetes diminuem, tendendo a entrar em patamares. Aquando da realização do ensaio, estes valores registam-se com os provetes a sobressair nas bordas do molde (fig. 57).

O comportamento verificado nos gráficos da amostra A3, no que respeita às penetrações de 2,5 e 5,0 mm, é também verificado no caso desta amostra. A resistência decresce sempre com o aumento do teor em água, para a mesma penetração.

Quanto à penetração de 2,5 mm, o valor mais elevado da resistência registado é referente ao provete compactado com o teor em água de 3,75% que corresponde a 2952,14 kPa. Já para os

provetes compactados com 5,78% e 7,34% de teor em água, os valores registados foram, respetivamente, 1882,86 e 1743,39 kPa.

Para a penetração de 5,0 mm, o provete compactado com teor em água de 3,75%, teor em água inferior ao ótimo, continuou a registar o valor mais elevado de resistência de todos, 5474,24 kPa. O valor da resistência do provete compactado com teor em água de 5,78% registado foi de 2417,50 e 1789,88 kPa para o compactado com 7,34% do teor em água.



Figura 57. Condição de um provete após atingir resistência máxima

Na figura 58 e tabela 17, apresentam-se os resultados obtidos para a amostra Z2

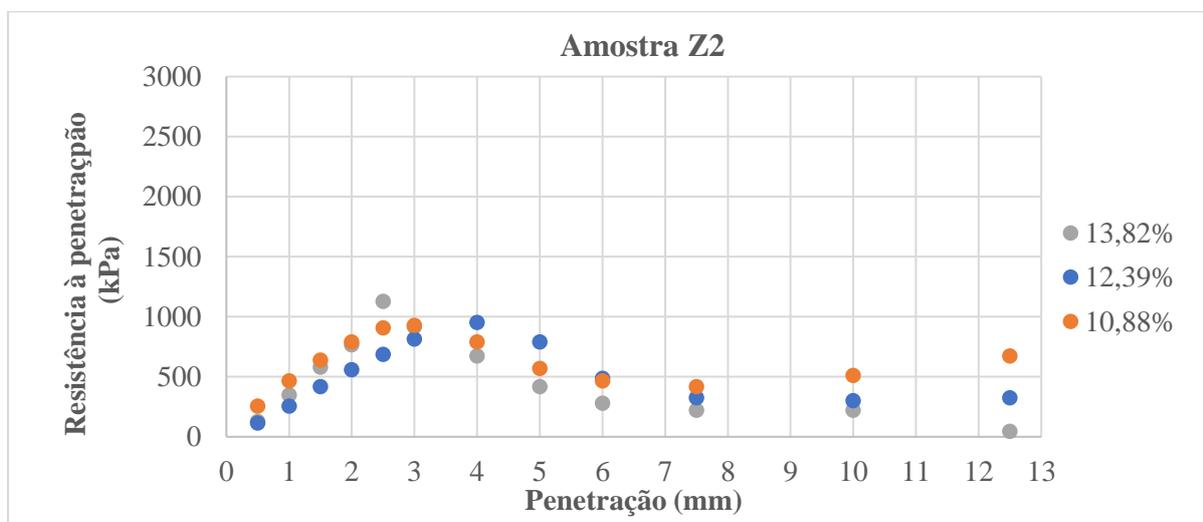


Figura 58. Resultados dos ensaios de punção da amostra Z2

Tabela 17. Resultados parciais do punçoamento da amostra Z2

Penetração (mm)	R (kPa)	Teor em água (%)
2,5 mm	1127,39	13,82
	685,73	12,39
	906,56	10,88
5,0 mm	418,41	13,82
	790,34	12,39
	569,51	10,88

Da projeção acima (fig. 58 e tabela 17) pode-se observar que na penetração de 2,5 mm, no provete compactado com teor em água de 10,88%, a resistência registada foi de 906,56 kPa, de 685,73 kPa para o compactado com o teor em água de 12,39% e 1127,39 kPa para o compactado com teor em água de 13,82%.

Para a penetração de 5,0 mm, o provete compactado com 12,39%, registou o valor de resistência mais elevado de todos, 790,34 kPa e o valor da resistência do provete compactado com teor em água de 10,88%, relativamente maior que do compactado com o teor em água de 13,82%, respetivamente, 569,51 e 418,41 kPa.

Igualmente, na figura 59 e tabela 18, apresentam-se os resultados obtidos para a amostra Z3

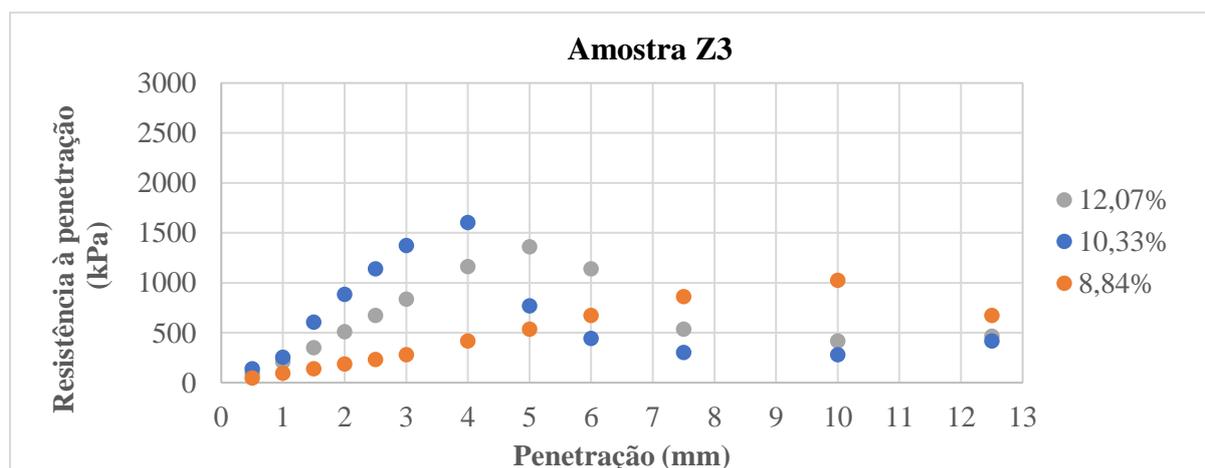


Figura 59. Resultados dos ensaios de punçoamento da amostra Z3

Tabela 18. Resultados parciais do punçoamento da amostra Z3

Penetração (mm)	R (kPa)	Teor em água (%)
2,5 mm	674,11	12,07
	1139,01	10,33
	232,45	8,84
5,0 mm	1359,84	12,07
	767,09	10,33
	534,64	8,84

Para esta amostra, os provetes compactados com teores em água de 10,33% e 12,07% são os que registaram os valores mais elevados de resistência à penetração, exibindo o primeiro, valores mais elevados que dos do segundo, na parte inicial da penetração. Para a penetração de 2,5 mm, o valor registado para o provete compactado com 8,84% de teor em água foi de 232,45 kPa, de 1139,01 kPa para o compactado com teor em água próximo do ótimo (10,33%) e de 674,11 kPa para o provete compactado com teor em água de 12,07%.

Para a penetração de 5,0 mm, o provete compactado com teor em água de 8,84% passou a registar uma resistência de 534,64 kPa, os compactados com 10,33% e 12,07% de teor em água, passaram a registar resistência à penetração, respetivamente, de 767,09 e 1359,84 kPa.

Tendo em conta a análise dos resultados, apresentada para os ensaios realizados nas diferentes amostras, verifica-se que parte deles contrariam o referido por Caputo (1988) anteriormente citado, uma vez que segundo este autor, é esperado que a compactação no ramo seco conduza a obtenção de valores mais elevados de resistência em comparação com os obtidos no ramo húmido. Tratando-se de resistência à penetração, baseando-se em Caputo (1988) seria natural que nesta compactação com teores em água inferiores se obtivessem valores de resistência superiores à obtida com os provetes compactados com os teores em água ótimo (e superior ao ótimo), isto porque, segundo este autor, esta resistência decresce com o aumento do teor em água.

4.4.2.1. Recuperação de solos após penetração

Na realização dos ensaios de resistência à penetração, conforme é explicado anteriormente no capítulo 3 (no ponto 3.3.6.2), o ensaio dá-se por concluído após a penetração dos 12,5 mm. Neste sentido, pára-se a prensa e faz-se descer o prato onde assenta o molde, com a posterior

remoção do molde e ajustamento do pistão. No entanto, aquando da realização dos ensaios com as amostras da série A, imediatamente após a paragem da prensa e sem que se iniciasse a descida do prato, notou-se que o defletómetro instalado no pistão com a função de medir a força de penetração se movimentava no sentido contrário do realizado na fase de carregamento sobre o provete, indicando uma ação que o solo exerce sobre o pistão, ou seja, uma recuperação do solo após penetração que acontece quando a tensão exercida pelo pistão cessa. Este comportamento foi possível de observar e medir apenas sobre os provetes do conjunto A, porque acontecia de forma gradual até instantes em que se nota o seu enfraquecimento com registo de valores de resistência que tende a atingir patamares.

Aquando da realização dos ensaios, estabeleceu-se um critério metodológico capaz de permitir esta análise. Assim, a metodologia baseou-se na medição da força de recuperação com o passar do tempo (em min), com medições realizadas e intercaladas de 5 em 5 min até aos 30 min, tempo a partir do qual a variação da força se encontra estabilizada sem variação digna de registo. Nos gráficos que apresentam a seguir, a semelhança dos demais, os pontos a cor referenciam o teor em água com que os provetes foram compactados, sendo que em ordenadas se representa a tensão de recuperação após penetração (em kPa) e em abcissas, o tempo passado para se registar aquela tensão (em min). É de salientar que esta análise tem como referência a última leitura que se efetua na penetração, a penetração de 12,5 mm (tempo 0 nos gráficos), pelo que os valores desta recuperação partem do mais elevado até aos baixos.

Vejamos os resultados registados na amostra A1, a seguir, para este comportamento de recuperação de solos após penetração, figura 60.

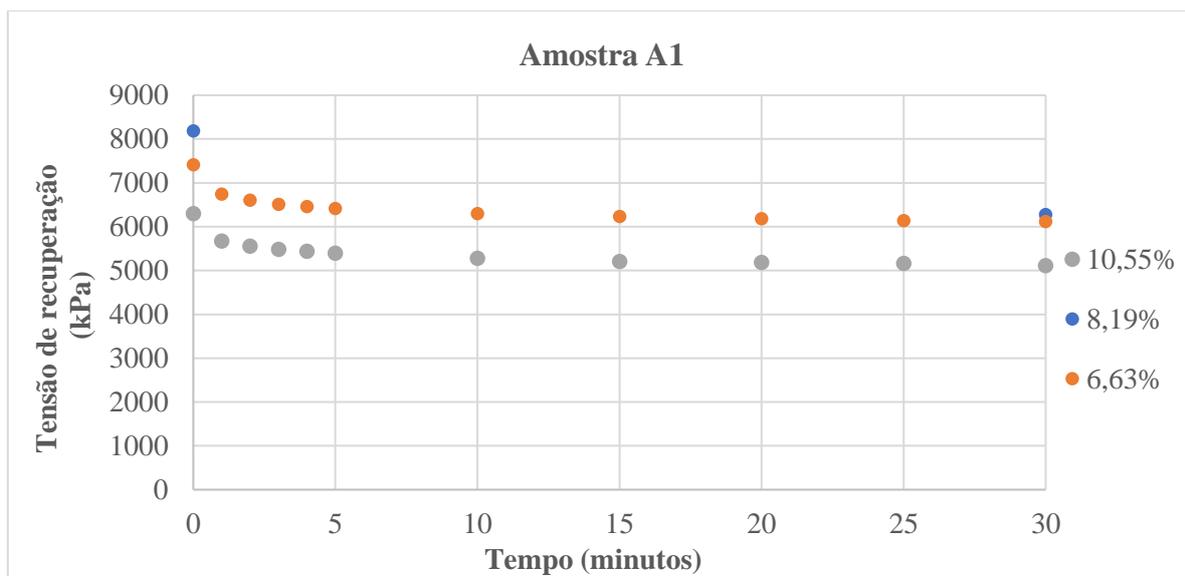


Figura 60. Resultados da recuperação de solos após penetração da A1

Como se pode observar no gráfico (fig. 60), tanto como nos outros três que se seguem e que merecerão atenção, a tensão de recuperação dos solos até os 10 min apresenta uma variação decrescente e daí em diante, até os 30 min, esta tensão tende a registar valores mais baixos e de certa forma, constantes. Note-se que, a começar com o provete compactado com menos teor em água (6,63%), após registo da tensão de 7415,21 kPa ($t=0$), passados 5 min, este valor desce para 6415,67 e 6113,48 kPa, passados 30 min, ou seja, facto que ilustra o enfraquecimento desta ação do solo sobre o pistão.

O mesmo pode-se notar no provete compactado com teor em água superior ao ótimo (10,55%), após registo duma tensão de 6299,45 kPa (no instante 0 min), desce para 5276,66 e 5113,94 kPa, nos instantes de 10 e 30 min, respetivamente. Para o provete compactado com o teor em água próximo do ótimo (8,19%), uma vez que este comportamento tinha sido notado, sem, contudo, haver ainda uma metodologia adotada para a sua análise, os únicos valores registados foram no início da recuperação (8182,31 kPa) e ao passar dos 30 min, onde se registou um valor de 6276,20 kPa.

Neste gráfico, pode-se notar que a variação da tensão de recuperação após que cessa a ação constante de carregamento, ocorre de forma brusca nos primeiros momentos e se vai enfraquecendo com o passar do tempo.

Podemos notar que a evolução destes valores registados para cada provete desta amostra, comparando os instantes 0 e 30 min, evidenciam este comportamento de recuperação e

consequente ação do solo de tendência de retornar ao estado anterior antes da penetração. Atendendo às figuras 52 e 60, comparando a penetração (fig. 52) e recuperação (fig. 60), para o provete compactado com teor em água próximo do ótimo, por exemplo, a penetração de 12,5 mm corresponde a uma resistência à penetração de 8182,31 kPa, que corresponde também a leitura da recuperação no instante 0. Já na leitura no instante de 30 min, passa a registrar um valor de tensão de 6276,20 kPa, um valor aproximado ao de 62252 kPa, registrado na penetração de 7,5 mm. Neste instante de 30 min após a paragem da prensa, o provete compactado com teor em água inferior ao ótimo, passa a registrar um valor de 6113,48 kPa e o compactado com teor em água superior ao ótimo, um valor de 5113,94 kPa, valores próximos aos registados na penetração de 10 mm, respetivamente, 6322,69 e 5160,43 kPa.

Relativamente a esta amostra A1, considerando o grau de recuperação em função do teor em água de compactação, nota-se que o provete compactado com teor em água próximo do ótimo apresenta maior capacidade de recuperação após penetração.

Outra amostra que merece análise é a A2, cujos resultados se apresentam na figura 61, abaixo.

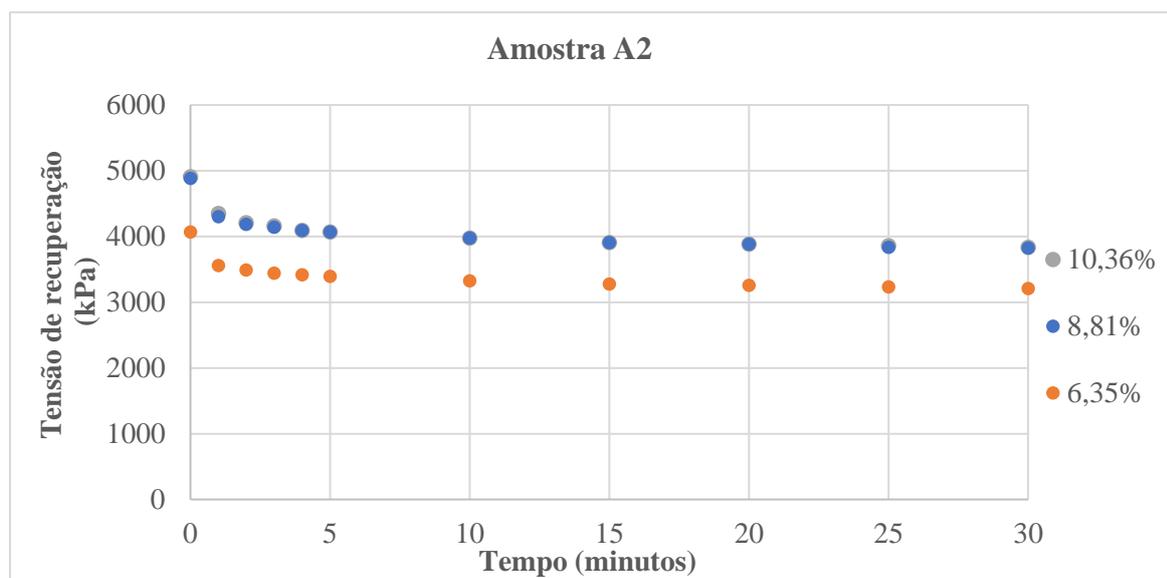


Figura 61. Resultados da recuperação de solos após penetração da A2

Comparando a penetração (fig. 53) e recuperação (fig. 61), podemos observar um comportamento similar ao analisado acima. Nos instantes 0 e 30 min, o provete compactado com teor em água próximo do ótimo, a penetração de 12,5 mm corresponde a uma resistência à penetração de 4881,49 kPa, que corresponde também a leitura da recuperação no instante 0. Já na leitura no instante de 30 min, passa a registrar um valor de tensão de 3823,83 kPa, próximo ao valor de 3649,49 kPa, registrado na penetração de 7,5 mm. Neste instante de 30 min após o

final do ensaio, o provete compactado com teor em água inferior ao ótimo, regista um valor de 3207,84 kPa e o provete compactado com teor em água superior ao ótimo, um valor de 3835,46 kPa, que se aproxima, respetivamente, de 2975,38 e 3974,93 kPa, lidos na penetração de 5 mm para o primeiro e 7,5 mm para o segundo.

Neste caso da amostra A2, observando os dados dos diferentes provetes, nota-se que os provetes compactados com teor em água próximo do ótimo e superior ao ótimo, recuperam do mesmo modo após interrupção do carregamento, sendo essa recuperação superior à observada no provete compactado com menor teor em água.

Análise igual é realizada para a amostra A3, conforme os dados projetados no gráfico abaixo, figura 62.

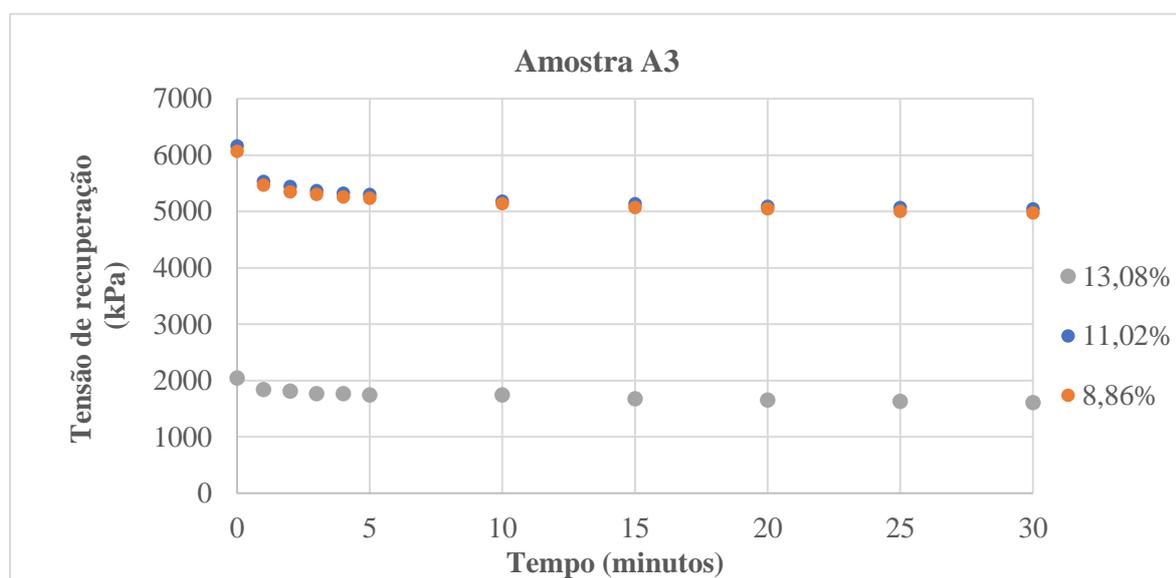


Figura 62. Resultados da recuperação de solos após penetração da A3

Da observação ao gráfico (fig. 55) e (fig. 62), que correspondem os comportamentos verificados de penetração e recuperação de solos após esta mesma penetração, podemos também notar que a evolução destes valores registados, comparando os instantes 0 e 30 min, como foi feito anteriormente. Para o provete compactado com teor em água próximo do ótimo, a penetração de 12,5 mm corresponde a uma resistência à penetração de 6159,97 kPa, que corresponde também a leitura da recuperação no instante 0. Já na leitura realizada no instante de 30 min após o fim do carregamento, regista-se um valor de tensão de 5044,21 kPa, valor esse próximo de 5276,66 kPa, registado na fase de carregamento para a penetração de 10 mm. Também para os outros dois provetes se percebe que aos 30 minutos após a interrupção do carregamento, a recuperação se encontrava estabilizada em valores próximos aos

correspondentes às resistências medidas para penetrações de 10 mm. Assim, no caso do provete compactado com menor valor do teor em água, a recuperação estabilizou em 4974,47 kPa (sendo 5323,15 kPa o valor obtido para penetração de 10 mm). No caso do provete compactado com maior valor do teor em água, a recuperação estabilizou em 1603,92 kPa (sendo 1650,41 kPa o valor obtido para penetração de 10 mm).

De um modo geral, quanto à recuperação de solos após penetração, pode dizer-se que os provetes das amostras A1, A2 e A3, exibiram todos idêntica tendência de recuperação da tensão após interrupção do carregamento, embora a extensão dessa recuperação seja variável.

No que respeita as amostras do conjunto Z, pudemos observar que, contrariamente ao que aconteceu para o conjunto das amostras A, a recuperação ocorrida após a interrupção do carregamento aconteceu de forma brusca e com pouquíssima variação, insuficiente para merecer análise. Assim, a comparação do comportamento exibido pelas amostras Z, com o apresentado pelo conjunto de amostras A, evidencia a diferença do tipo de recuperação que estes materiais apresentam. Os solos do conjunto A tendem a recuperar-se após o carregamento sofrido para uma penetração de 12,5 mm, exibindo elasticidade, facto que nos permite ponderar a existência de minerais argilosos na sua composição, contrariamente ao que se observou para os solos constituintes das amostras do conjunto Z.

4.4.3. Corte direto

Tal como os ensaios anteriores, foram realizados ensaios de resistência ao corte dos solos após compactação.

Relativamente ao cisalhamento, Prates (2018) considera que a ruína dos aterros acontece devido a rotura dos taludes ou da fundação. No primeiro caso, devido a incompatibilidade entre a resistência ao corte dos materiais e a altura do aterro e a inclinação do talude. No segundo, por falta de capacidade resistente da fundação, devido às tensões de corte induzidas pelas cargas transmitidas, associadas também à altura do aterro, bem como, à inclinação dos taludes.

De acordo com Caputo (1988) diversos métodos podem ser utilizados para a determinação da resistência ao cisalhamento. Esta resistência definida pela equação de Coulomb considera a coesão (c) e o atrito interno (ϕ). Neste trabalho, estes parâmetros foram obtidos através do corte direto como é explicado anteriormente no capítulo 3 (no ponto 3.3.7).

Neste ensaio, a força de corte é aplicada e o provete vai resistindo com aumento do valor da resistência até que rompe, momento a partir do qual se dá redução do valor da resistência, que depois se estabiliza. O valor máximo de resistência corresponde à resistência de pico, e o valor de resistência correspondente à fase de estabilização após rotura, designa-se por resistência residual. É segundo Skempton (1964, Cit. por Minguens, 2016):

“O valor mínimo de resistência ao corte que pode ser obtido através de grandes deslocamentos em ensaios com condições drenadas e orientação das partículas lamelares na direção do corte. É importante nas obras geotécnicas, na avaliação da estabilidade de taludes que contenham superfícies de corte pré-existentes, e na avaliação do risco de rotura progressiva em problemas como a estabilidade de taludes.”

Em cada provete compactado com determinado teor em água, foram retirados e ensaiados pelo menos três provetes para ensaio de corte, sendo cada um deles sujeito a uma carga vertical diferente. Os dados resultantes dos ensaios, de tensão (N/cm^2) versus deformação horizontal são projetados num gráfico como se apresenta na figura 63, a seguir.

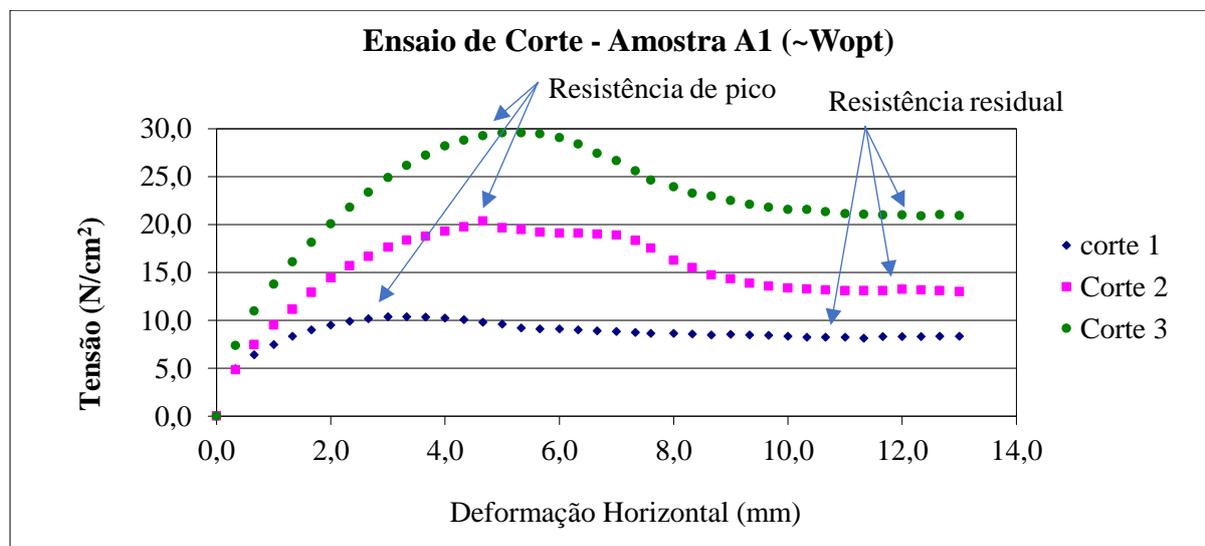


Figura 63. Resultados de corte da amostra A1

Assim, do gráfico acima (fig. 63), para uma mesma amostra, retiram-se três pontos correspondentes ao valor de tensão de pico de cada um dos cortes executados, com os quais se constrói outro gráfico que relaciona a tensão de rotura (em ordenada) com a tensão vertical em cada um dos cortes executados (em abcissa) (fig. 64). Com base neste gráfico é então determinado o valor de coesão e ângulo de atrito da amostra naquelas condições de compactação.

Procede-se do mesmo modo usando agora o valor da resistência residual de cada corte construindo-se outro gráfico residuais (fig. 65), com base no qual se determinam então os valores de coesão e ângulo de atrito.

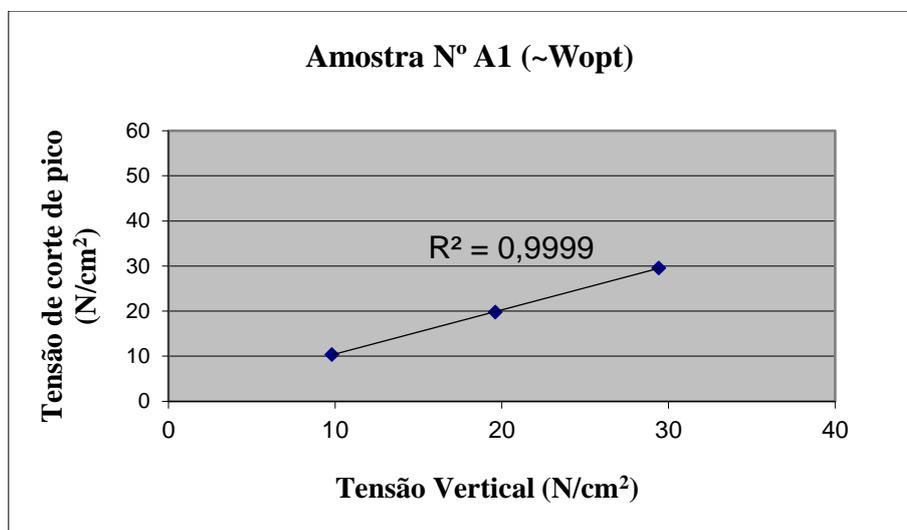


Figura 64. Determinação da coesão e ângulo de atrito da amostra A1 (proвете compactado com ~Wópt)

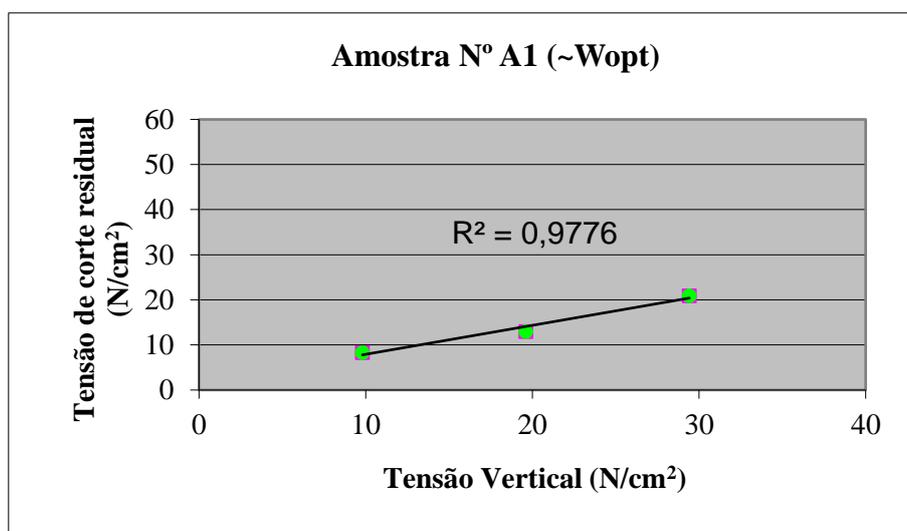


Figura 65. Determinação da coesão e ângulo de atrito (residual) da amostra A1 (proвете compactado com ~Wópt)

Convertidos os dados (de N/cm²) para o sistema de unidades internacional (em kPa), se obtiveram todos os resultados que aqui se apresentam para esta análise da influência do teor em água na resistência ao corte dos solos compactados. Assim, apresentam-se os valores do ângulo de atrito (ϕ) e da coesão (c) correlacionados com o teor em água (%) com que os solos foram compactados. Por fim, naquelas mesmas condições de humidade com que se obtiveram

estes parâmetros, apresentam-se ainda gráficos que relacionam a variação da tensão de rotura com a umidade, considerando uma carga vertical de 30,00 kPa.

4.4.3.1. Resistência ao corte

Tal como referido anteriormente, a resistência ao corte pode ser analisada de dois pontos de vista: primeiro, do ponto de vista da resistência de pico que se for ultrapassada provoca a rotura dos solos; segundo, do ponto de vista da resistência residual, que permanece após rotura, isto é, mínima resistência que se regista após atingir-se a resistência de pico.

Deste modo, analisam-se os dados do corte referente à resistência de corte (de pico e residual), primeiro, para o conjunto de amostras A e de seguida, para as amostras do conjunto Z. Analisam-se os dados do ângulo de atrito (ϕ) e da coesão obtidos, bem como, os valores da tensão de corte provenientes da simulação considerando uma tensão normal de 30,00 kPa, nas condições de humidade com que estes mesmos parâmetros de coesão e ângulo atrito foram obtidos, para aquelas duas situações.

4.4.3.1.1. Ângulo de atrito (ϕ)

4.4.3.1.1.1. Ângulo de atrito (resistência de pico)

Na figura 66 a seguir, apresentam-se os resultados obtidos para a amostra A1, considerando ensaios realizados em provetes compactados com três teores em água distintos.

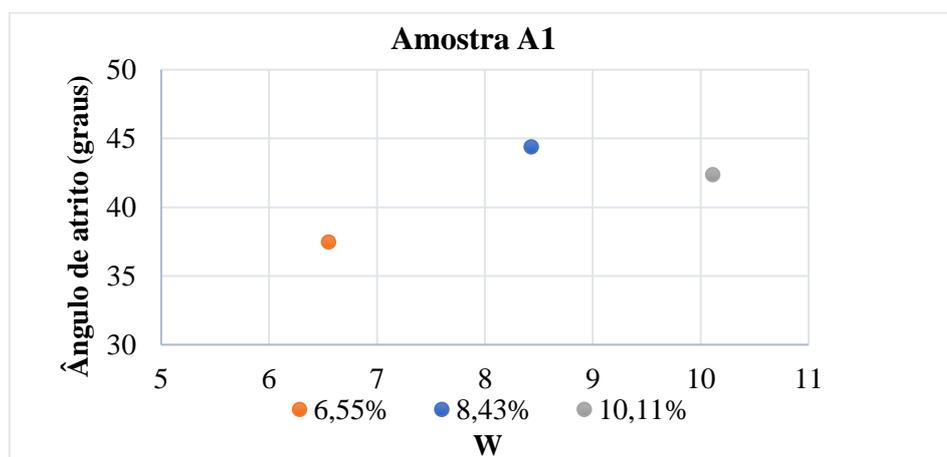


Figura 66. Variação do valor do ângulo de atrito em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A1

Nas condições de humidade ilustrada no gráfico acima (fig. 66), com que a amostra foi compactada, para o provete compactado com teor em água próximo do ótimo, obteve-se $\phi = 44,39^\circ$, correspondendo este ao valor mais elevado. Com teor em água inferior ao ótimo (6,55%) o ϕ obtido foi de $37,46^\circ$ e para o teor em água superior, obteve-se valor de $\phi = 42,37^\circ$. Como se pode observar, o ângulo de atrito desta amostra evolui numa linha de tendência de variação em função do teor em água, idêntica à observada na curva de compactação Proctor.

Assim, tendo em conta os valores do teor em água dos provetes, a variação do valor do ângulo de atrito é semelhante à variação da baridade seca e também idêntica à variação da resistência à compressão simples, na medida em que aumenta com o aumento do humedecimento alcançando o valor mais elevado no provete compactado com teor próximo do ótimo de compactação e reduz a partir desse ponto, com a continuação do humedecimento. Assim, em relação a esta amostra e tendo em consideração os resultados obtidos, podemos concluir que o ângulo de atrito é influenciado pelo teor em água que o solo tiver no momento da sua compactação, e a sua variação tem forma idêntica à que se observa para a baridade seca.

A seguir, na figura 67, apresentam-se os resultados obtidos da amostra A2.

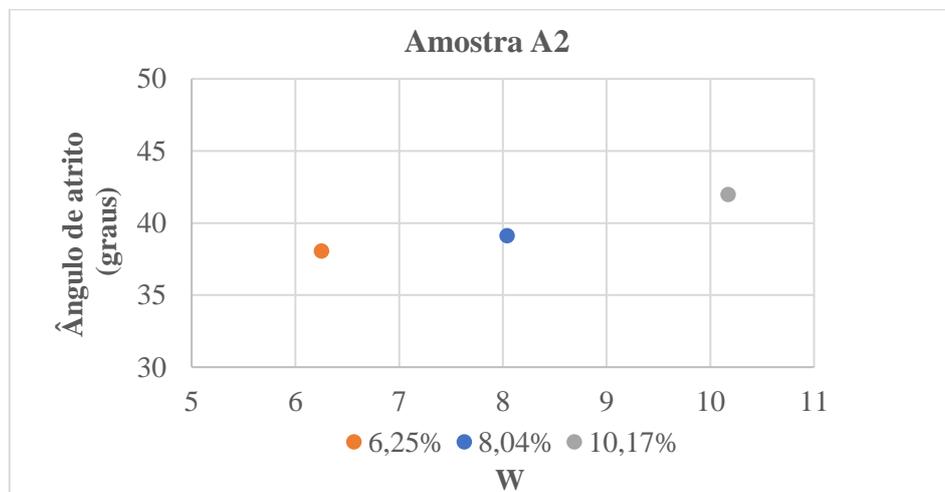


Figura 67. Variação do valor do ângulo de atrito em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A2

Pelo gráfico acima (fig. 67), nota-se que a variação do ângulo de atrito com a variação do teor em água de compactação, tem uma evolução diferente da apresentada anteriormente para o caso da amostra A1. Neste caso, com o provete compactado com menor valor do teor em água (6,25%) obteve-se $\phi = 38,06^\circ$, com o provete compactado com teor em água próximo do ótimo obteve-se $\phi = 39,12^\circ$, e com o compactado com teor em água superior ao ótimo (10,17%) o

valor de $\phi = 41,98^\circ$, ou seja, a tendência da variação do ângulo de atrito, com a variação do teor em água do solo compactado, é diferente do observado para o caso da amostra A1, no qual o valor mais elevado deste parâmetro correspondeu ao provete compactado com teor em água próximo do ótimo. Deste modo a conclusão a que se chegou atrás para o caso da amostra A1, não se aplica neste caso em que a conclusão a que se chega é a de que o ângulo de atrito aumenta com o aumento do teor em água de compactação.

Outra amostra ensaiada foi a amostra A3, cujos resultados se apresentam a seguir (fig. 68).

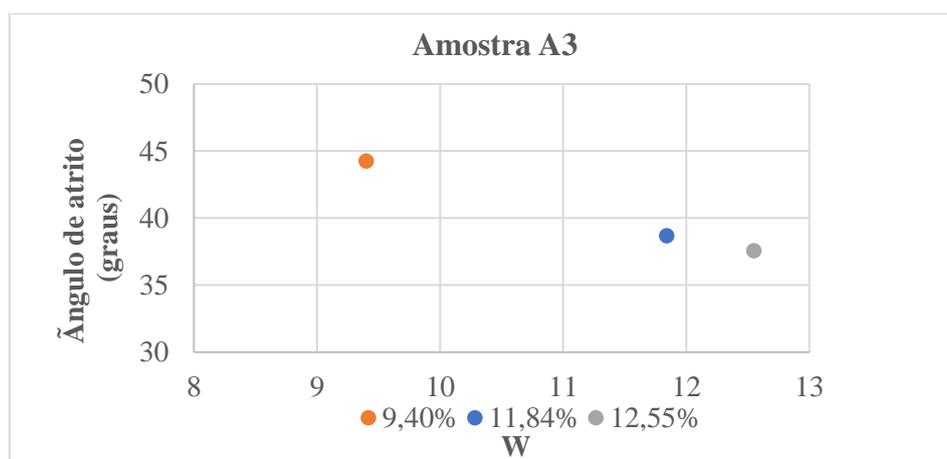


Figura 68. Variação do valor do ângulo de atrito em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A3

Relativamente a esta amostra, deparamo-nos com uma situação diferente das duas observadas anteriormente, onde numa (no caso da A1) o ϕ aumentava com o aumento da humidade até se atingir o teor em água próximo do ótimo e a partir daí, com este mesmo aumento, o ϕ passava a diminuir, e noutra (no caso da A2), este apenas aumentava. Nesta amostra A3, o ϕ diminui sempre com o aumento do teor em água, pois, dos provetes compactados e ensaiados, o compactado com teor em água inferior ao ótimo (9,40%) conduziu a um $\phi = 44,24^\circ$, o compactado com teor em água próximo do ótimo (11,84%), permitiu obter $\phi = 38,68^\circ$ e o compactado com teor em água superior ao ótimo (12,55%), revelou um valor de $\phi = 37,55^\circ$.

Como se disse anteriormente, foram ensaiadas e analisadas seis amostras de solos, por isso, a seguir, apresentam-se também os resultados obtidos para o conjunto de amostras Z, preparados com base nos dados coligidos da dissertação de José Serrão (Serrão, 2018).

Na figura 69, representam-se os resultados obtidos referentes a Z1.

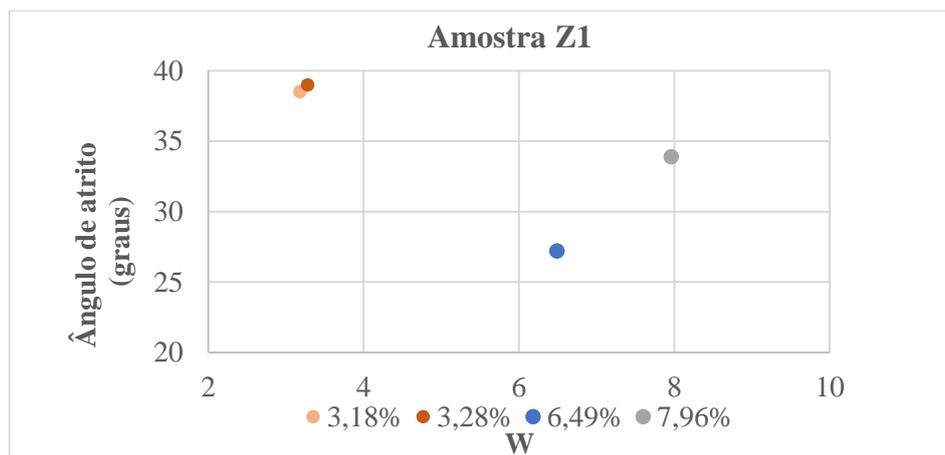


Figura 69. Variação do valor do ângulo de atrito em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z1. Dados coligidos (Serrão, 2018)

Como se pode verificar do gráfico (fig. 69), a projeção dos resultados obtidos por José Serrão na amostra Z1, revela um outro comportamento diferente dos três observados acima nas amostras do conjunto A. Observa-se uma evolução côncava, isto é, com curvatura oposta à observada no caso da amostra A1, que exibia curvatura convexa. Nesta amostra, o provete compactado com teor em água próximo do ótimo de compactação (6,49%) apresentou o valor de ângulo de atrito mais baixo, $\phi = 27,20^\circ$ e corresponde ao ponto de inflexão entre duas tendências: tendência decrescente entre valores relativos a teores em água inferiores ao ótimo (3,18% e 3,25%) e ao valor próximo do ótimo (6,49%) e tendência crescente, a partir do valor próximo do ótimo até ao valor correspondente ao teor em água mais elevado (7,96%). Assim, para Z1, observa-se que o ângulo de atrito diminui com o aumento do teor em água até ao valor próximo do ótimo de compactação, e aumenta a partir daí, com o contínuo aumento do teor em água de compactação, diferindo do comportamento observado para as três amostras do conjunto A (A1, A2 e A3).

Na figura 70, apresentam-se os resultados da amostra Z2, no entanto, não se determinou o valor do ângulo de atrito para provete cujo teor em água fosse maior que o ótimo.

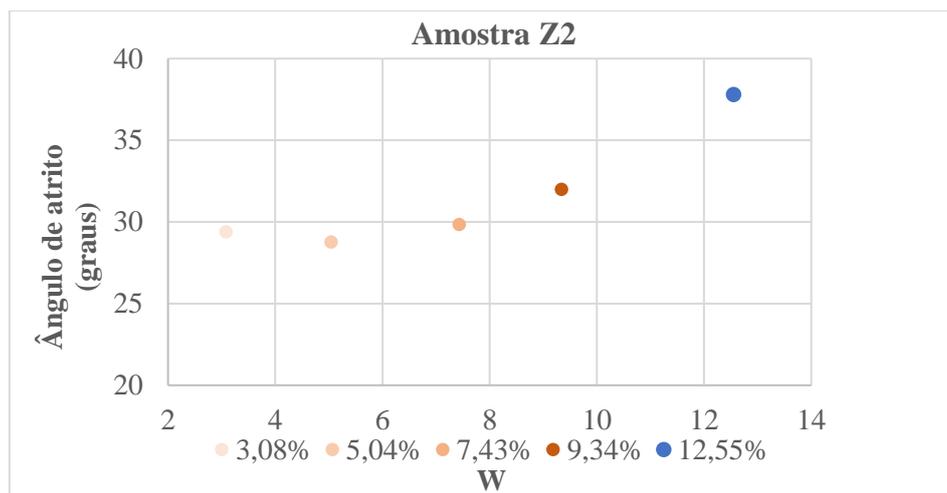


Figura 70. Variação do valor do ângulo de atrito em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z2. Dados coligidos (Serrão, 2018)

Comparando-se os dados disponíveis referentes a esta amostra (fig. 70), observa-se uma tendência de aumento do ângulo de atrito, com o correspondente aumento do valor do teor em água de compactação até ao valor correspondente ao teor próximo do ótimo, excetuando uma ligeira variação de decréscimo entre o valor correspondente ao ponto relativo ao menor teor em água (3,08%) e o ponto seguinte (5,04%).

Sem considerar a projeção de dados que corresponderiam aos teores em água superior ao ótimo, e excetuando a situação do primeiro ponto do gráfico, este comportamento é similar ao observado na amostra A2, onde o ângulo de atrito aumentava com o aumento do teor em água, veja-se que o valor de ϕ obtido no provete compactado com o mínimo teor em água foi de 29,40° e o compactado com teor em água próximo do ótimo foi de 37,81°.

Para fechar o total das seis amostras, nesta análise do ângulo de atrito obtido na resistência ao corte, na figura 71, apresentam-se resultados da amostra Z3.

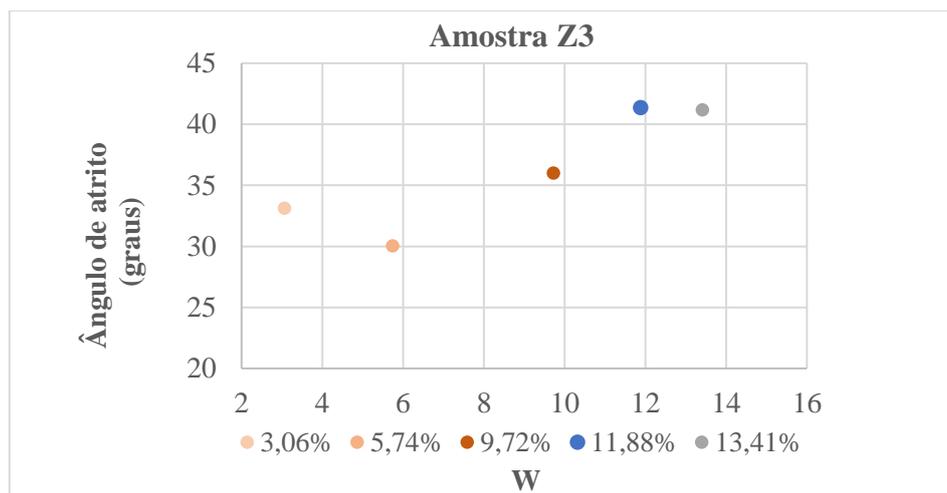


Figura 71. Variação do valor do ângulo de atrito em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z3. Dados coligidos (Serrão, 2018)

O comportamento do ângulo de atrito obtido (fig. 71) é, relativamente, semelhante àquele observado na amostra A1, embora, não muito bem destacado, uma vez que o provete compactado com teor em água superior ao ótimo tem o ângulo de atrito bastante próximo do compactado com teor em água próximo do ótimo. Por outro lado, é também semelhante ao observado no caso da amostra Z2, em que se nota uma ligeira concavidade na parte inicial da tendência desenhada pelos pontos correspondentes aos menores teores em água. No provete compactado com teor em água próximo do ótimo, obteve-se $\phi = 41,35^\circ$, o valor mais elevado. Com teores em água inferiores ao ótimo (de 3,06 a 11,88%), o ϕ aumenta de $33,13^\circ$ até $41,35^\circ$ (com exceção de um ligeiro decréscimo entre o primeiro e o segundo ponto), e a partir do compactado com teor em água próximo do ótimo, este passa a diminuir de $\phi = 41,35^\circ$ para $\phi = 41,18^\circ$. Sem considerar o primeiro ponto, este comportamento vai de acordo com o da baridade seca na compactação Proctor, e com o da compressão simples, ou seja, ϕ aumenta com o aumento do humedecimento e alcança o seu valor mais elevado com teor água próximo do ótimo de compactação e reduz, a partir daí, com a continuação do humedecimento.

4.4.3.1.1.2 Ângulo de atrito (resistência residual)

Na figura 72 a seguir, apresentam-se os resultados obtidos para a amostra A1, considerando os ensaios realizados em provetes compactados com três teores em água distintos.

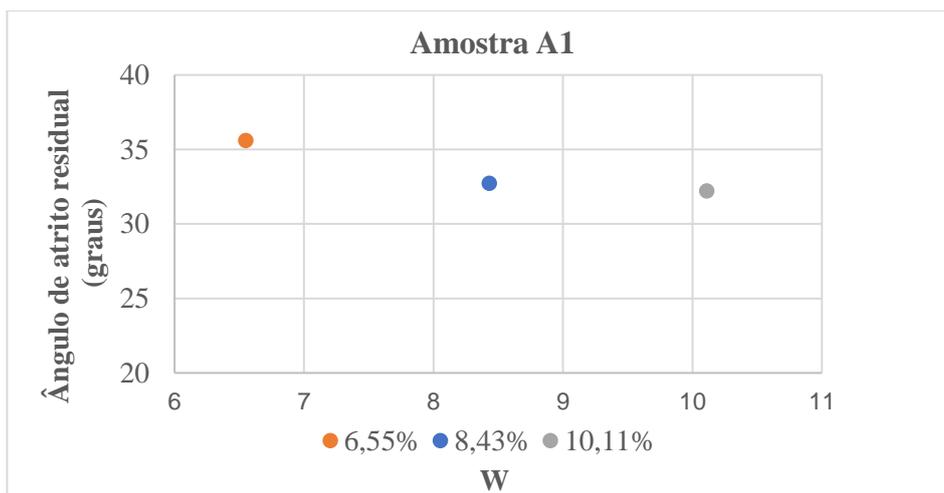


Figura 72. Variação do valor do ângulo de atrito residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A1

Decorrente dos ensaios de corte e após rotura dos provetes, os valores de ângulo de atrito residual obtidos para a A1 foram, respetivamente, 35,61°, 32,72° e 32,22°, para o provete compactado com teor em água inferior ao ótimo, próximo do ótimo e superior ao ótimo. Como se pode observar, há uma redução do ângulo de atrito residual com o aumento do teor em água de compactação.

Verifica-se que o ângulo de atrito residual desta amostra diminui com o aumento do teor em água de compactação, contrariamente ao que acontece com o ângulo de atrito (na resistência de pico), onde este tende a aumentar com o aumento da humidade até ao teor em água próximo do ótimo de compactação, e a partir daí, tende a diminuir.

A seguir, na figura 73, apresentam-se os resultados obtidos para amostra A2.

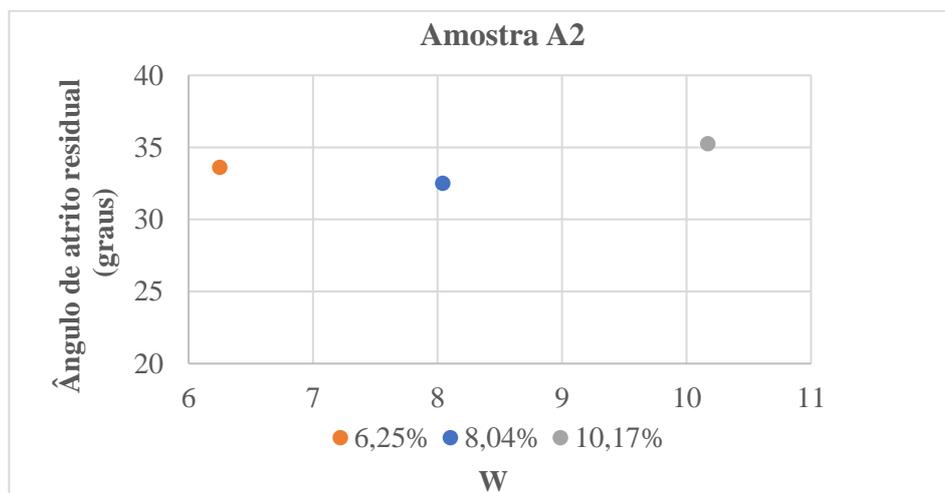


Figura 73. Variação do valor do ângulo de atrito residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A2

Pelo gráfico acima (fig. 73), nota-se claramente, que o comportamento apresentado é diferente do caso anterior. Do provete compactado com menor valor do teor em água (6,25%) obteve-se $\phi = 33,62^\circ$, do provete compactado com teor em água próximo do ótimo obteve-se $\phi = 32,51^\circ$, e por fim, o valor mais alto deste parâmetro foi obtido no provete compactado com teor em água superior ao ótimo, $\phi = 35,25^\circ$. Verifica-se assim que a tendência da variação do ângulo de atrito com a variação do teor em água do solo compactado é diferente do observado para o caso da amostra A1.

Nesta amostra, o ângulo de atrito residual diminui ligeiramente até ao teor em água próximo do ótimo e a partir daí, aumenta com o aumento do teor em água de compactação, diferindo do observado para o ângulo de atrito obtido na resistência de pico, nesta mesma amostra.

Outra amostra ensaiada e que merece análise neste trabalho é a amostra A3, cujos resultados se apresentam a seguir (fig. 74).

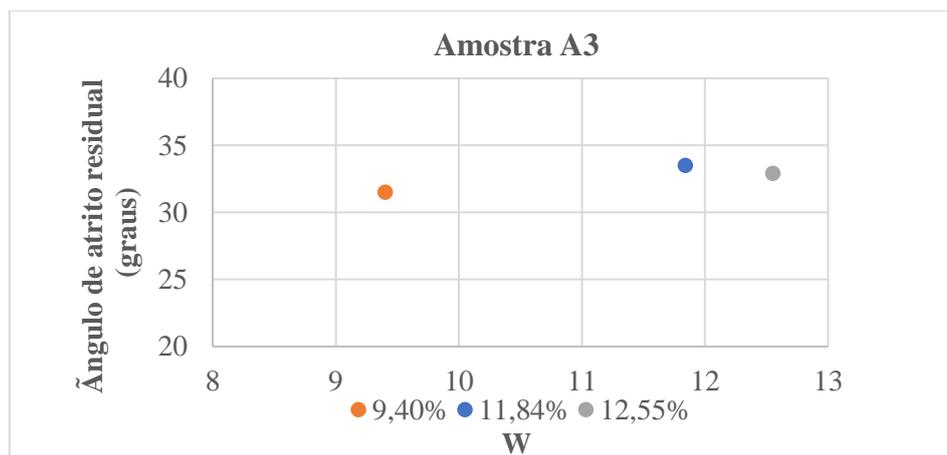


Figura 74. Variação do valor do ângulo de atrito residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A3

Relativamente a esta amostra, para os três teores em água ensaiados, como é evidente na figura 74 acima, o ângulo de atrito residual revela outro comportamento, diferente do observado nas duas amostras anteriores. A compactação do provete com teor em água inferior ao ótimo (9,40%) conduziu a um $\phi = 31,50^\circ$, com teor em água próximo do ótimo (11,84%), obteve-se $\phi = 33,52^\circ$ e com teor em água de 12,55%, o valor obtido para este parâmetro foi $\phi = 32,92^\circ$. Neste caso, o ângulo de atrito é crescente para os teores em água crescentes utilizados até ao teor em água próximo do ótimo de compactação, e decresce depois com o sucessivo aumento do teor em água.

O comportamento do aumento deste parâmetro com o teor em água de compactação até ao teor em água próximo do ótimo de compactação, diverge do observado nesta mesma amostra na resistência de pico, onde o ângulo de atrito diminui ao invés de aumentar.

A seguir apresentam-se e analisam-se os gráficos com os resultados obtidos nas amostras do conjunto Z, preparados com base nos dados coligidos da dissertação de José Serrão (Serrão, 2018).

Primeiramente, na figura 75, apresenta-se o gráfico com os resultados da amostra Z1, referente ao ângulo de atrito residual.

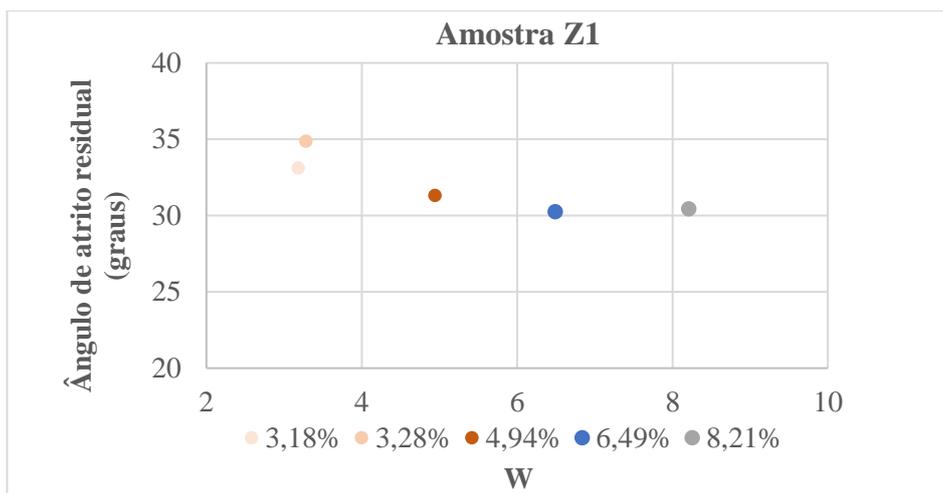


Figura 75. Variação do valor do ângulo de atrito residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z1. Dados coligidos (Serrão, 2018)

Como se pode verificar (fig. 75), com a projeção dos resultados obtidos por José Serrão na amostra Z1, com exceção da variação entre os dois primeiros pontos (menores valores de teor em água), observa-se uma tendência geral de decréscimo do ângulo de atrito residual com o aumento do teor em água de compactação, até ao valor próximo do teor ótimo de compactação. Após este último, verifica-se um ligeiro aumento do ângulo de atrito residual, alterando a tendência de variação. Este comportamento corresponde ao registado para a variação dos valores de ângulo de atrito na resistência de pico, embora nesse caso a diferença entre valores era mais pronunciada.

Continuando esta análise, importa também analisar os dados obtidos (figura 76) da amostra Z2, embora sem dados do ângulo de atrito para provete cujo teor em água fosse superior ao ótimo.

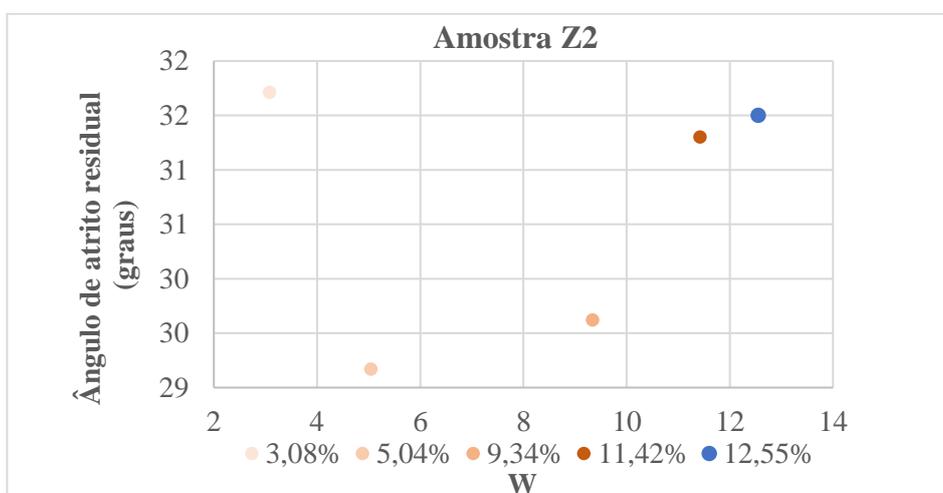


Figura 76. Variação do valor do ângulo de atrito residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z2. Dados coligidos (Serrão, 2018)

Uma análise ao gráfico acima (fig. 76), leva, primeiro, a notar que há uma certa variação de decréscimo do valor do ângulo de atrito residual quando o teor em água de compactação sobe de 3,08% (primeiro ponto do gráfico) para 5,04% (segundo ponto do gráfico). Contudo, entre o segundo ponto ($W = 5,04\%$) e o último ponto ($\sim W_{\text{ópt}} = 12,55\%$), o ângulo de atrito residual aumenta com o aumento do teor em água de compactação. Esta tendência, embora de evolução mais suave (exceto entre os 2 primeiros pontos em que a variação é mais acentuada), é idêntica à verificada para o ângulo de atrito na resistência de pico.

Na figura 77, apresentam-se resultados da amostra Z3 no que concerne ainda a análise do ângulo de atrito residual.

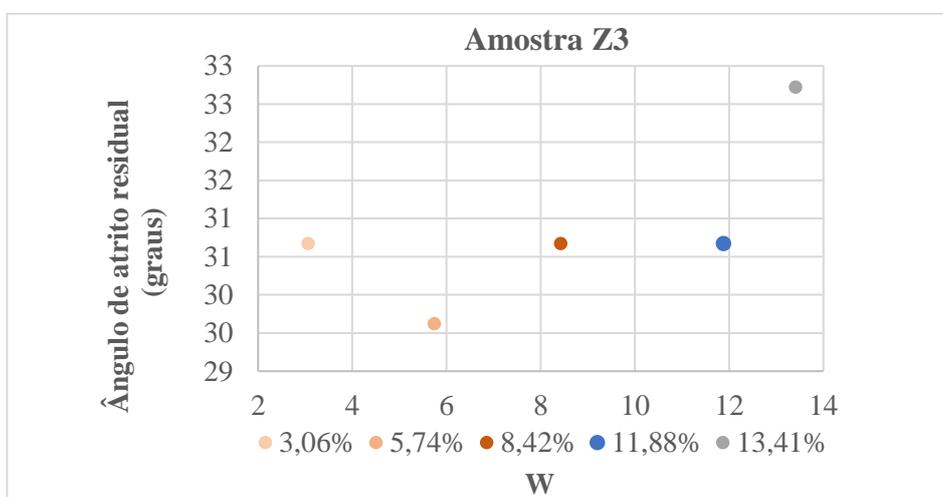


Figura 77. Variação do valor do ângulo de atrito residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z3. Dados coligidos (Serrão, 2018)

Tal como se pode observar do gráfico acima (fig. 78), o ângulo de atrito residual aumenta com o aumento do teor em água de compactação. Tendo por referência o provete compactado com teor em água de 5,74% onde o ângulo de atrito registado foi de 29,62°, nota-se uma variação de aumento deste parâmetro, uma vez que no provete compactado com teor em água próximo do ótimo (11,88%) o ângulo passou a registar o valor de 30,67°, e 32,72° para o provete compactado com teor em água superior ao ótimo (13,41%). Também se verifica um decréscimo do valor entre os primeiro e segundo pontos. Nota-se assim que esta tendência de evolução é semelhante à observada no caso do ângulo de atrito da resistência de pico.

4.4.3.1.1.3. Análise geral do ângulo de atrito

De um modo geral, para conjunto das amostras Z, tirando um ou outro aspeto pontual, a evolução do ângulo de atrito residual é similar àquela observada no ângulo de atrito na resistência de pico. O mesmo não se pode dizer no que respeita às amostras do conjunto A.

Analisando os dados no seu todo quanto a este parâmetro, de acordo com Terzaghi & Peck (1963) Cit. por Rodrigues (2015) os valores dos ângulos de atritos obtidos são típicos de areias, sobretudo, compactas que variam entre 35° e 46°, uma vez os resultados obtidos neste estudo mostram que o ângulo de atrito da maior parte das amostras ensaiadas próximo do teor em água ótimo de compactação varia entre 37,81° e 44,39°, sendo a exceção o valor de 27,81°, obtido para a amostra Z1.

Importa realçar a proximidade existente entre os valores obtidos para amostras diferentes dentro de um mesmo conjunto de solos, que certamente se deve também ao facto de estes solos possuírem curvas granulométricas e valores de consistência semelhantes sendo todos eles classificados granulometricamente como solos arenosos.

Os resultados obtidos neste estudo, mostram ainda que para cada amostra o ângulo de atrito residual é inferior ao ângulo de atrito em resistência de pico.

4.4.3.1.2. Coesão (c)

Para além da apreciação feita no ponto anterior a propósito da variação do ângulo de atrito com a variação do teor em água, neste ponto procura-se fazer apreciação idêntica, considerando a coesão, isto é, coesão referente à resistência de pico e residual.

4.4.3.1.2.1. Coesão (resistência de pico)

A figura 78, a seguir, apresenta a projeção dos resultados da coesão obtidos em provetes da amostra A1, compactados com diferentes teores em água, conforme se fez menção anteriormente.

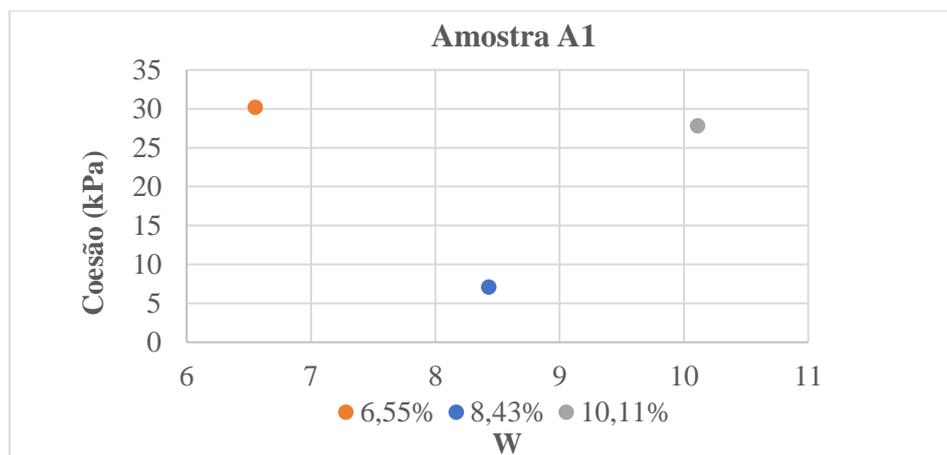


Figura 78. Variação do valor da coesão em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A1

Pela observação do gráfico nota-se primeiro um decréscimo do valor da coesão com o aumento do valor do teor em água de compactação, até atingir o teor em água próximo do ótimo, pois, do provete compactado com teor em água inferior ao ótimo (6,55%) obteve-se um valor da coesão de 30,20 kPa, enquanto no compactado com teor em água próximo do ótimo (8,43%) o valor da coesão medido foi de 7,10 kPa. A partir do valor do teor próximo do ótimo, a variação da coesão com o aumento do teor em água passa a ser crescente, dado que no provete compactado com teor em água de compactação superior ao ótimo (10,11%), o valor da coesão medido foi de 27,80 kPa, superior aos 7,10 kPa medidos no provete compactado com teor em água próximo do ótimo. Assim, o valor do teor próximo do ótimo de compactação corresponde ao ponto de viragem daqueles sentidos de variação descritos, cujo valor da coesão é inferior aos outros dois.

Relativamente à amostra A2, na figura 79, apresenta-se o gráfico com a projeção dos resultados da coesão, obtidos nos ensaios de corte realizados com provetes compactados com três teores em água distintos.

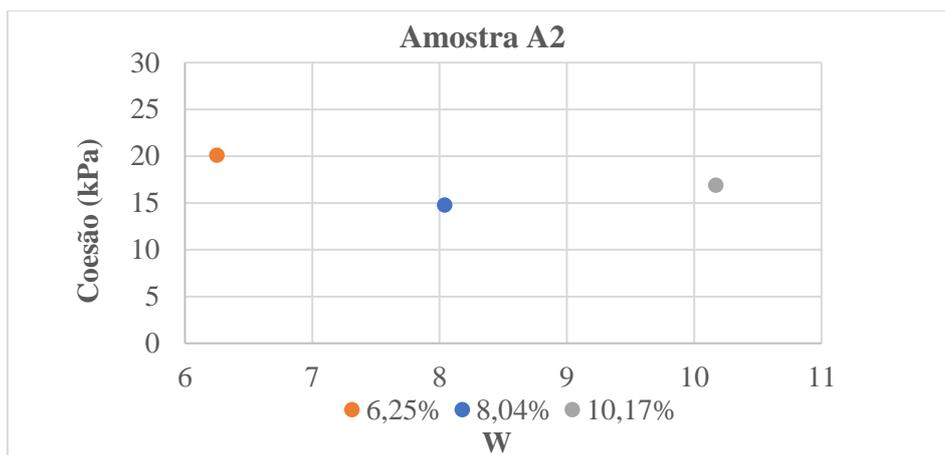


Figura 79. Variação do valor da coesão em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A2

Decorrente do ensaio de corte realizado sobre os provetes desta amostra (fig. 79), para o provete compactado com teor em água de 6,25%, teor inferior ao ótimo, o valor da coesão registado foi de 20,10 kPa, tendo o provete compactado com teor em água próximo do ótimo (8,04%), registado coesão de 14,80 kPa, e o provete compactado com teor em água mais elevado (10,17%), registado coesão de 16,90 kPa. Deste modo, a distribuição dos valores de coesão da amostra A2, obtidos para os diferentes teores em água de compactação, evidenciam variação idêntica à observada anteriormente, na amostra A1, ou seja, a coesão diminui com o aumento do teor em água de compactação até que se atinja o teor próximo do ótimo e a partir desse ponto, passa aumentar.

Para o caso da amostra A3, também pode observar-se no gráfico constante da figura 80, a projeção dos resultados da coesão, obtidos nos ensaios de corte realizados em provetes compactados com três teores em água diferentes.

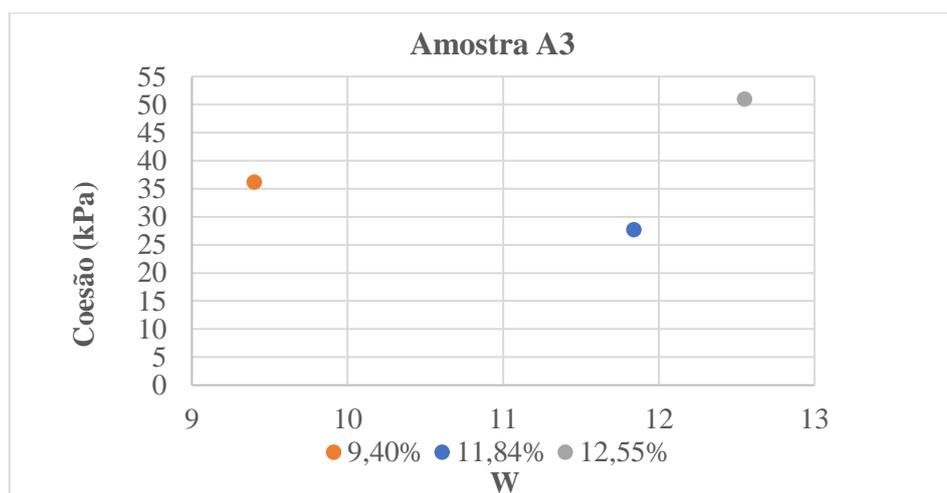


Figura 80. Variação do valor da coesão em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A3

Neste caso, tal como observado na apreciação dos resultados das amostras A1 e A2, anteriormente apresentados, os provetes compactados com teores em água de compactação inferior (9,40%) e superior (12,55%) em relação ao compactado com teor próximo do ótimo, são os que apresentaram valores de coesão superiores, tendo este último, apresentado o valor mais baixo de coesão. Ora, os valores de coesão para aqueles provetes foram, respetivamente, 36,20 e 51,00 kPa, enquanto para o compactado com teor em água próximo do ótimo de compactação, o valor de coesão registado foi de 27,70 kPa.

Quanto aos resultados que caracterizam as amostras do conjunto Z, exibe-se agora a apreciação feita com apresentação dos gráficos preparados com os dados coligidos de Serrão (2018).

Na figura 81, apresenta-se a projeção dos valores de coesão, correspondentes aos resultados dos ensaios de corte realizados com provetes da amostra Z1, também compactados com diferentes teores em água.

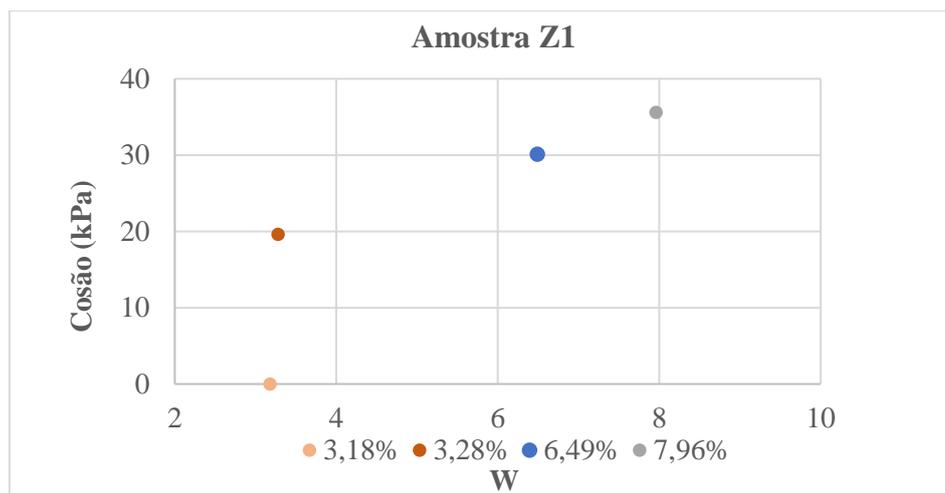


Figura 81. Variação do valor da coesão em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z1. Dados coligidos (Serrão, 2018)

Pelo gráfico acima (fig. 81), o valor mais elevado obtido foi de 35,60 kPa correspondente ao provete compactado com maior teor em água (7,96%), sendo que o intermédio, compactado com teor próximo do ótimo (6,49%) foi de 30,10 kPa e o mais baixo, de 0,00 kPa corresponde ao compactado com 3,18%. Mas também, se pode notar no gráfico que outro provete compactado com teor em água de 3,28%, também inferior ao ótimo, apresentou o valor de coesão maior ao que o antecede, estando ambos, abaixo dos restantes. Nota-se de igual modo que, a partir do primeiro provete em diante, numa tendência clara de incremento dos valores de coesão com o aumento do teor em água de compactação.

Nota-se assim que nesta amostra a tendência de evolução da coesão em função do teor de humidade, é diferente da observada nas amostras do conjunto A anteriormente analisadas.

Quanto à amostra Z2, os resultados de coesão obtidos por José Serrão, nos ensaios realizados, são agora apresentados no gráfico 82 abaixo.

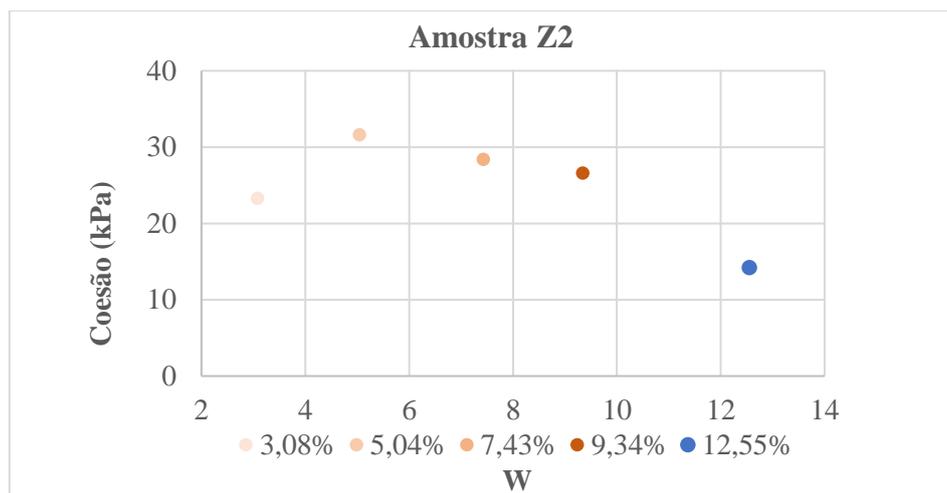


Figura 82. Variação do valor da coesão em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z2. Dados coligidos (Serrão, 2018)

Comparando-se os dados da figura 82, percebe-se que o provete compactado com teor em água inferior ao ótimo (5,04%) foi o que apresentou o valor mais elevado de coesão (31,60 kPa), e o valor mais baixo de coesão foi registado no provete compactado com teor em água próximo do ótimo (14,20 kPa). De um modo geral, excetuando a pequena variação dos valores de coesão entre 23,30 kPa, registado no provete compactado com $W = 3,08\%$ e de 31,60 kPa, no compactado com $W = 5,04\%$, a coesão diminui com o aumento do teor em água de compactação. Vale a pena realçar que ao contrário dos casos anteriores onde se tinha algum valor de provete compactado com teor em água superior ao ótimo, no caso da amostra Z2 na ausência do mesmo, não se consegue formular uma ideia mais abrangente do comportamento da coesão, tal como se fez nas amostras anteriores.

Continuando a análise igual ao comportamento da coesão em função do teor em água, agora para a amostra Z3, é apresentado, abaixo o gráfico (fig. 83) resultante da projecção dos dados medidos nos provetes desta amostra, coligidos de Serrão (2018) conforme se vem fazendo menção neste trabalho.

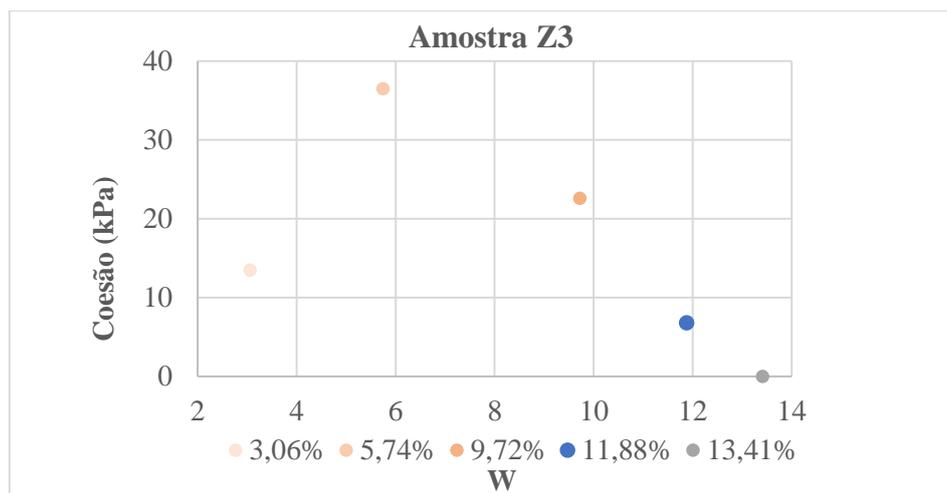


Figura 83. Variação do valor da coesão em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z3. Dados coligidos (Serrão, 2018)

Tal como no gráfico anterior, a projeção dos dados da coesão, tende a decrescer, verificando-se mesmo que no provete mais húmido, compactado com teor em água de 13,41%, a coesão igualou-se a zero. Excetuando o primeiro ponto, os provetes compactados com menor teor em água, foram os que apresentaram os valores mais elevados de coesão, (decrecendo sempre o valor de coesão com o aumento do teor em água) tendo o provete compactado com teor em água próximo do ótimo, apresentado valor intermédio de coesão.

4.4.3.1.2.2. Coesão (resistência residual)

Na figura 84, a seguir, apresenta-se a projeção dos resultados da coesão obtidos para a resistência residual, em provetes da amostra A1, compactados com diferentes teores em água.

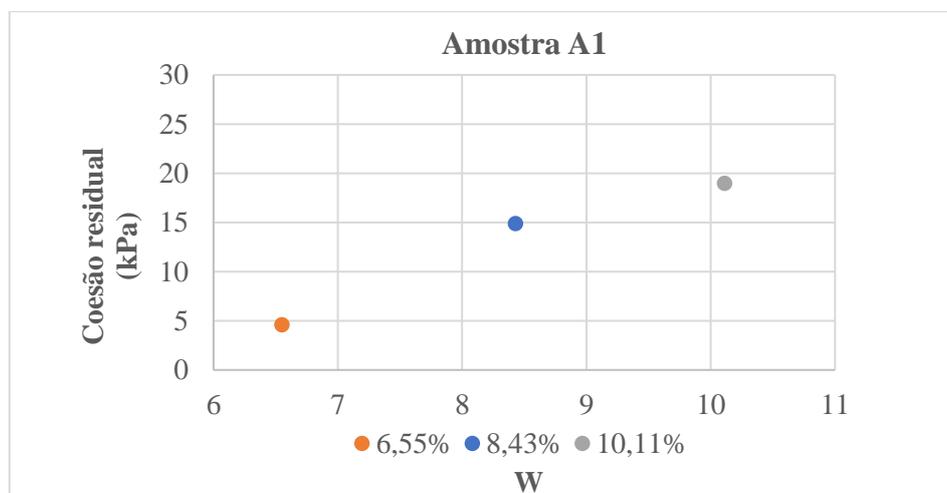


Figura 84. Variação do valor da coesão residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A1

Observa-se pelo gráfico acima (fig. 84) que a coesão residual varia de modo diferente daquele verificado anteriormente na resistência de pico, considerando os mesmos provetes desta mesma amostra A1. No provete compactado com teor em água inferior ao ótimo de (6,55%) o valor de coesão residual registado foi de 4,60 kPa e no compactado com teores em água próximo do ótimo (8,43%) e superior ao ótimo (10,11%) os valores foram, respetivamente, de 14,90 kPa e 19,00 kPa, mostrando tendência clara de aumento da coesão com o aumento do teor em água de compactação, contrariando assim, o comportamento verificado na coesão determinada na resistência de pico.

Relativamente à amostra A2, na figura 85, apresenta-se o gráfico com a projeção dos resultados da coesão residual obtidos nos ensaios de corte realizados com provetes compactados com diferentes valores de teor em água.

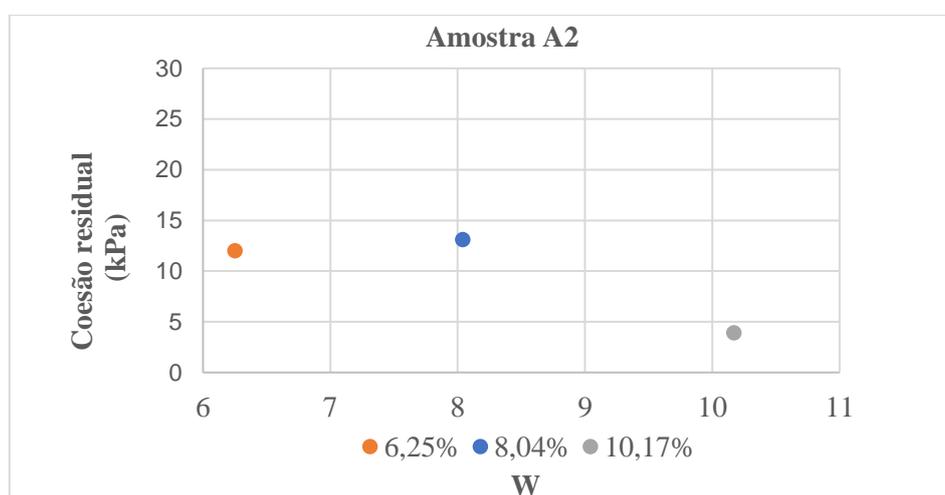


Figura 85. Variação do valor da coesão residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A2

Pode-se ver no gráfico (fig. 85) que no provete compactado com teor em água inferior ao ótimo (6,25%) a coesão registada foi de 12,00 kPa e para os compactados com teores em água próximo do ótimo (8,04%) e superior (10,17%), as coesões registadas foram, respetivamente, de 13,10 e 3,90 kPa.

Tal como no caso anterior, os resultados referentes à coesão residual (fig. 85) contrariam os da coesão obtida nas condições em que resistência é de pico, enquanto no segundo caso (resistência de pico) a coesão diminuía com o aumento do teor em água até o teor em água próximo do ótimo e a partir daí, passava a subir, no caso da resistência residual, a coesão

residual aumenta com o aumento do teor em água até ao teor em água próximo do ótimo, e passa a diminuir a partir desse ponto.

Para o caso da amostra A3, pode observar-se no gráfico constante da figura 86, a projeção dos resultados da coesão residual obtidos nos ensaios de corte realizados em provetes compactados com três teores em água diferentes, referente à coesão residual.

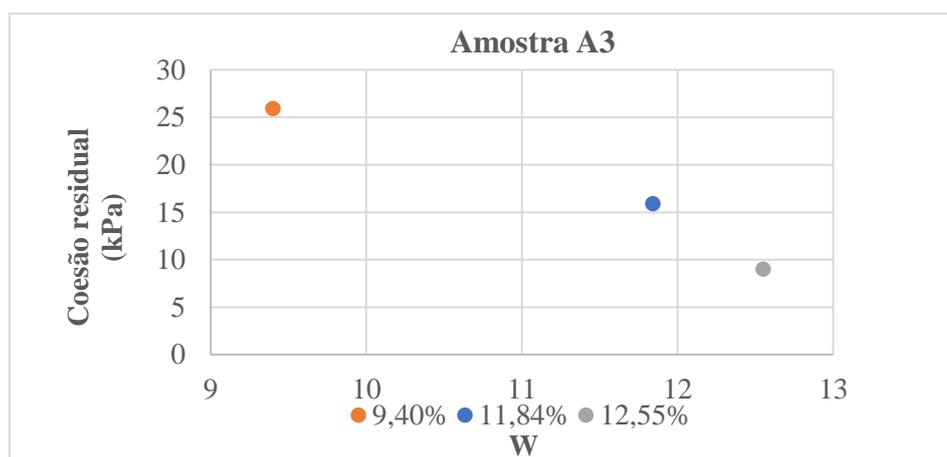


Figura 86. Variação do valor da coesão residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A3

Neste caso, tal como observado na apreciação dos resultados das amostras A1 e A2, anteriormente discutidos, o provete compactado com teor em água inferior ao ótimo é o que apresenta valor de coesão mais elevado. No provete compactado com teor em água inferior ao ótimo (9,40%) a coesão medida foi de 25,90 kPa, para o provete compactado com teor em água próximo do ótimo (11,84%) a coesão medida foi de 15,90 kPa e de 9,00 kPa para o provete compactado com teor em água superior ao ótimo (12,55%).

Nesta amostra observa-se a diminuição da coesão com o aumento do teor em água. A tendência de variação assim observada para a coesão residual difere da anteriormente observada para a coesão na resistência de pico.

Quanto aos resultados que caracterizam as amostras do conjunto Z, exibe-se agora a apreciação feita com apresentação dos gráficos preparados com os dados coligidos de Serrão (2018).

Na figura 87, apresenta-se a projeção dos valores de coesão residual, correspondentes aos resultados dos ensaios de corte realizados com provetes da amostra Z1, compactados com diferentes teores em água.

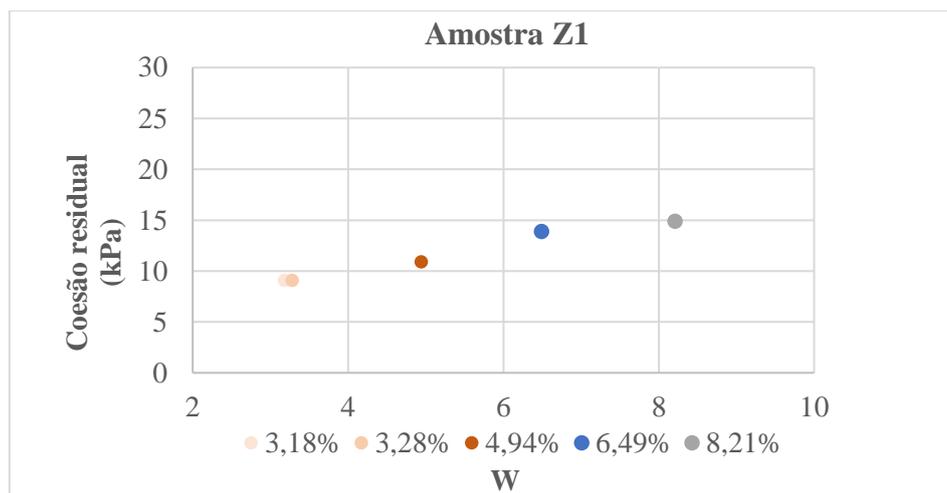


Figura 87. Variação do valor da coesão residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z1. Dados coligidos (Serrão, 2018)

O comportamento dos resultados nesta amostra quanto à coesão residual é idêntico àquele observado no da coesão na resistência de pico. Conforme se pode ver no gráfico (fig. 87), os provetes compactados com teores em água inferiores ao ótimo apresentam valores baixos de coesão, de 9,10 kPa para os compactados com teores em água de 3,18% e 3,28%, e de 10,90 kPa para o provete compactado com teor em água de 4,94%. Esta tendência de crescimento dos valores de coesão residual com o aumento do teor em água, mantém-se para os restantes provetes testados, embora se note um abrandamento no crescimento dos valores referidos a partir do teor ótimo de compactação.

Ou seja, a coesão residual aumenta com o aumento do teor em água de compactação, tal como observado para os valores de coesão em resistência de pico. A tendência agora observada para coesão residual da amostra Z1 é também semelhante à verificada para a amostra A1 na resistência residual.

Quanto à amostra Z2, os resultados da coesão residual obtidos por José Serrão, nos ensaios realizados, são agora apresentados no gráfico 88 a seguir.

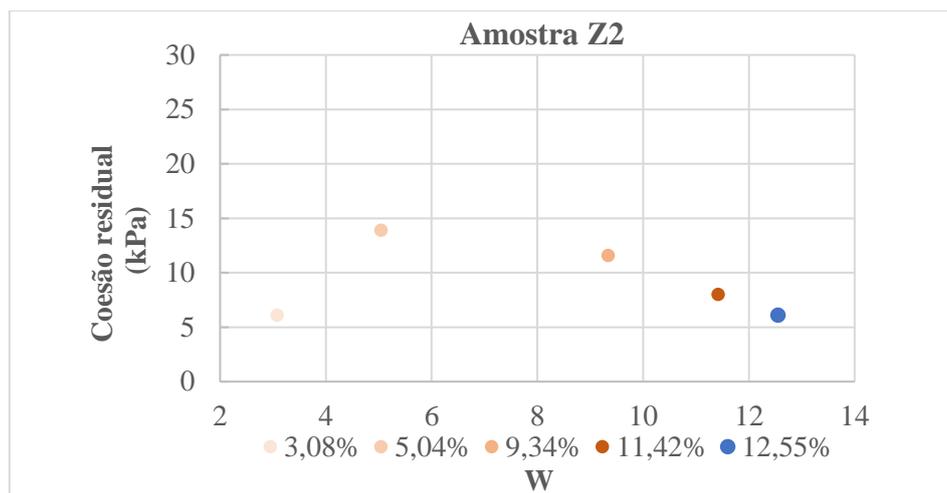


Figura 88. Variação do valor da coesão residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z2. Dados coligidos (Serrão, 2018)

Com base nos dados coligidos de Serrão (2018), referentes a esta amostra, observa-se que os resultados obtidos correspondem aos provetes compactados com o teor em água inferiores ao ótimo e próximo do ótimo. Comparando-se os dados, o provete compactado com teor em água de 3,08% apresentou coesão residual de 6,10 kPa, registrando-se os valores de coesão residual de 13,29 kPa, 11,60 kPa e de 8,00 kPa para os provetes compactados com teores em água, de 5,04 %, 9,34% e de 11,42%, respectivamente. Para o provete compactado com teor em água próximo do ótimo a coesão residual registada foi de 6,10 kPa.

Estes dados apresentados sugerem uma ligeira subida deste parâmetro entre os provetes compactados com teores em água de 3,08% e 5,04%. Excetuando-se esta pequena evolução e a inexistência de algum valor deste parâmetro registado em provete compactado com teor em água superior ao ótimo, a coesão residual diminui com o aumento do teor em água de compactação, tal como acontece no caso anterior, na resistência de pico.

Também para a amostra Z3 se apresenta a projeção dos dados obtidos por José Serrão (Serrão, 2018). O gráfico resultante dessa projeção é apresentado na figura 89, abaixo.

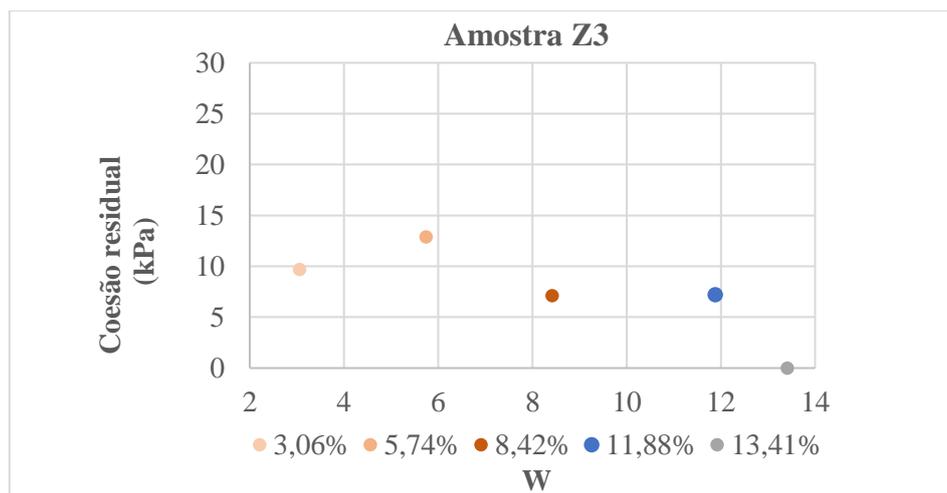


Figura 89. Variação do valor da coesão residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z3. Dados coligidos (Serrão, 2018)

No gráfico anterior (fig. 89), a projeção dos dados da coesão residual desta amostra, mostra alteração sucessiva na tendência de variação deste parâmetro em função da variação do teor em água de compactação. Excetuando o provete compactado com teor em água de 8,42%, os provetes compactados com teores em água inferiores ao ótimo foram os que apresentaram os valores mais elevados de coesão (com evolução crescente no sentido do aumento da humidade), seguidos pelo valor do compactado com teor em água próximo do ótimo (11,88%), cuja coesão registada foi de 7,20 kPa, e por último, pelo valor do compactado com teor em água superior ao ótimo (13,41%). No caso dos provetes compactados com teores em água inferiores ao ótimo, a coesão residual aumenta entre os dois primeiros pontos ($W = 3,06\%$ e $W = 5,74\%$) e diminui entre o segundo e terceiros pontos ($W = 5,74\%$ e $W = 8,42\%$) aumentando depois ligeiramente entre este último ($W = 8,42\%$) e o teor próximo do ótimo de compactação ($W = 11,88\%$).

Com exceção do valor de coesão referente ao teor em água de 8,42%, a tendência de variação da coesão residual com o aumento valor do teor em água, é semelhante ao observado anteriormente nesta amostra, para a coesão na resistência de pico.

4.4.3.1.2.3. Análise geral da coesão

Conforme como aconteceu no ângulo de atrito, a evolução dos dados relativos à coesão não é linear, uma vez que houve casos em que a tendência de evolução da coesão tanto aumentou como diminuiu, com o aumento do teor em água de compactação.

Outro aspeto interessante a realçar nestes dados da coesão na resistência de pico, é o facto de, nas amostras do conjunto A, os provetes compactados com teor em água próximo do ótimo, apresentarem valores de coesão baixos em relação aos compactados com teores em água inferiores e/ou superiores. Já nos resultados relativos às amostras do conjunto Z (também para a resistência de pico) não se observa o mesmo.

4.4.3.1.3. Tensão de corte versus teor em água

Feita a análise da variação do ângulo de atrito e da coesão com a variação do teor em água, importa analisar a influência do teor em água na resistência ao corte (de pico e residual) que é na verdade um dos objetivos de estudo. Com base na equação de Coulomb “ $\tau = c + \sigma \text{tg}\phi$ ” através da qual se obteve os parâmetros analisados acima, onde τ corresponde à resistência ao corte; c representa a coesão; σ representa a tensão vertical ou carregamento; e ϕ representa o valor do ângulo de atrito, simulou-se o valor da tensão de corte utilizando os parâmetros de resistência ao corte obtidos para cada amostra, nas respetivas condições de humidade. Assim, para esta simulação, considerou-se uma carga vertical, $\sigma = 30,00$ kPa, para todas as amostras.

Por exemplo, para amostra Z1, no caso do provete compactado com teor em água de 12,55%, os valores registados foram, respetivamente, $c = 30,10$ kPa e $\phi = 27,30^\circ$. Considerando $\sigma = 30,00$ kPa, determina-se a resistência ao corte através da fórmula anteriormente referida ($\tau = c + \sigma \text{tg}\phi$), que resultará em $\tau = 46,00$ kPa.

Com os valores da resistência ao corte assim calculados (considerando a tensão vertical de 30,00 kPa e os parâmetros de resistência ao corte (c e ϕ) determinados nos ensaios realizados), elaboraram-se gráficos que relacionam a resistência ao corte (em ordenadas) com a variação do teor em água de compactação (em abcissas), tanto para os valores obtidos a partir da resistência ao corte de pico, como para os valores obtidos para a resistência de corte residual.

4.4.3.1.3.1. Resistência ao corte (de pico)

Começando pela resistência ao corte máxima (de pico), apresentam-se os resultados obtidos para todas as amostras, começando pelas pertencentes à série A.

No gráfico que se segue (fig. 90), constam os resultados correspondentes à amostra A1.

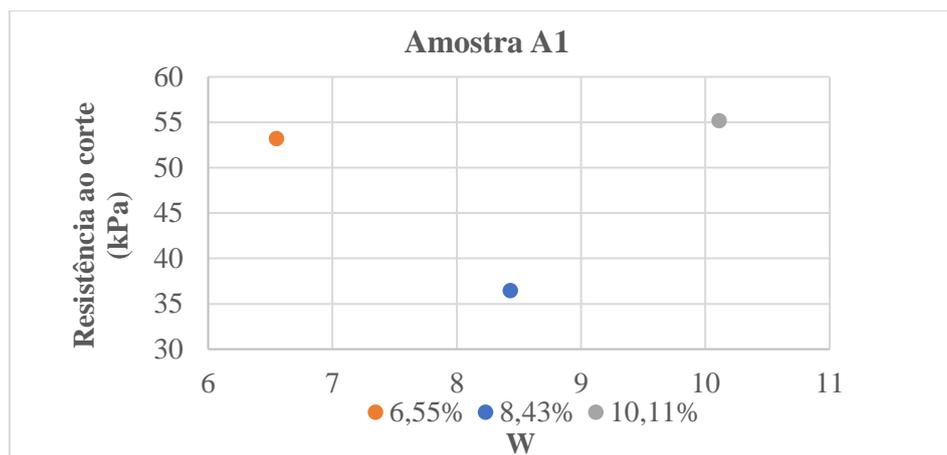


Figura 90. Variação do valor da resistência ao corte em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A1

Pela projeção dos dados acima (fig. 90), observa-se que o provete compactado com teor em água inferior ao ótimo (6,55%) apresenta resistência ao corte de 53,19 kPa e o compactado com teor superior (10,11%) exibe resistência de 55,16 kPa, sendo que o compactado com teor em água próximo do ótimo (8,43%), apresentou valor da resistência de 36,47 kPa. Com base nestes dados podemos concluir que, no caso desta amostra, a resistência ao corte diminui com o aumento do teor em água de compactação até atingir o teor em água próximo do ótimo, e aumenta a partir daí, com o aumento do teor em água.

Ademais, comparando estes resultados da resistência ao corte com os do ângulo de atrito e da coesão, percebe-se que este comportamento de diminuição da resistência com aumento do teor em água é mais afetado pela coesão, dado que a disposição dos pontos no gráfico se parecem mais com os da coesão do que com os do ângulo de atrito.

Procedeu-se do mesmo modo para os dados relativos à amostra A2.

No gráfico a seguir (fig. 91), apresentam-se os resultados correspondentes à amostra A2.

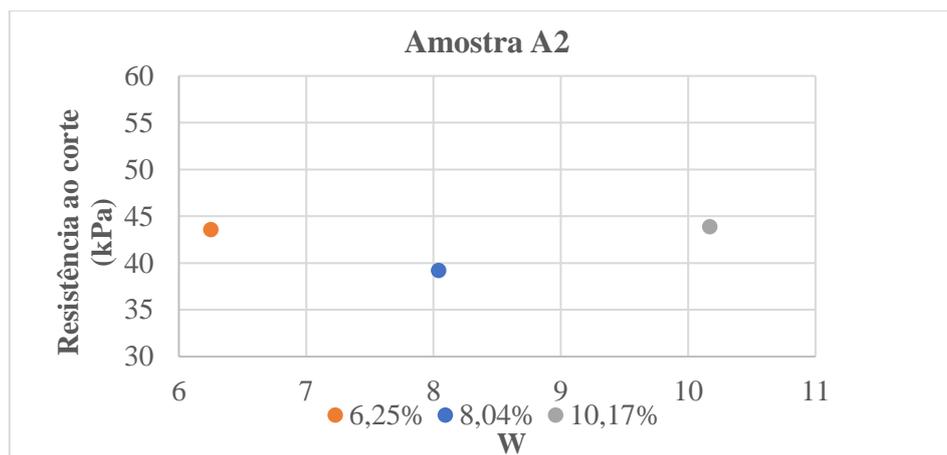


Figura 91. Variação do valor da resistência ao corte em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A2

Nesta amostra, a variação da resistência em função do valor do teor em água do solo, não difere da observada no caso da amostra A1. Na compactação do provete com teor em água inferior ao ótimo (6,25%), o valor da resistência ao corte obtido foi de 43,59 kPa, de 39,20 kPa para o provete compactado com teor em água ótimo (8,04%) e de 43,89 kPa para o provete compactado com teor em água superior ao ótimo, comprovando mais uma vez aquela observação feita anteriormente de que antes de se atingir o teor em água próximo do ótimo de compactação, com o aumento da humidade no solo diminui a resistência ao corte, e após passar o valor do teor próximo ao ótimo, com o contínuo aumento da humidade, aumenta esta resistência.

Relativamente à amostra A3, apresentam-se igualmente os resultados correspondentes da resistência versus teor em água.

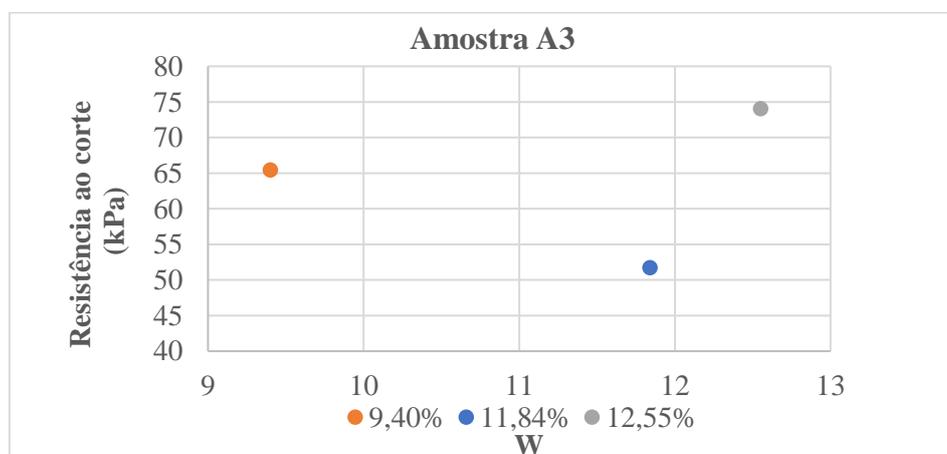


Figura 92. Variação do valor da resistência ao corte em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A3

Tal como acontece nos gráficos das amostras A1 e A2 analisados acima, neste (fig. 92) também a amostra A3 mantém o comportamento verificado naqueles. A resistência, primeiramente, decresce com o aumento do teor em água, de 9,40% para 11,84%, cujos valores registados foram, respetivamente, 65,41 e 51,72 kPa e posteriormente, aumenta com o aumento do teor em água de compactação, de 11,84% para 12,55%, com a resistência a exibir valores, respetivamente, de 51,72 e de 74,06 kPa. Ou seja, continuam as resistências dos provetes compactados com teores em água diferentes do ótimo, com resistências mais elevadas, relativamente às correspondentes ao teor próximo ao ótimo.

Relativamente as amostras da série Z, são apresentados seguidamente os gráficos obtidos para a resistência ao corte máxima (pico) versus teor em água de compactação.

Assim, na figura 93 a seguir, apresentam-se os resultados da amostra Z1.

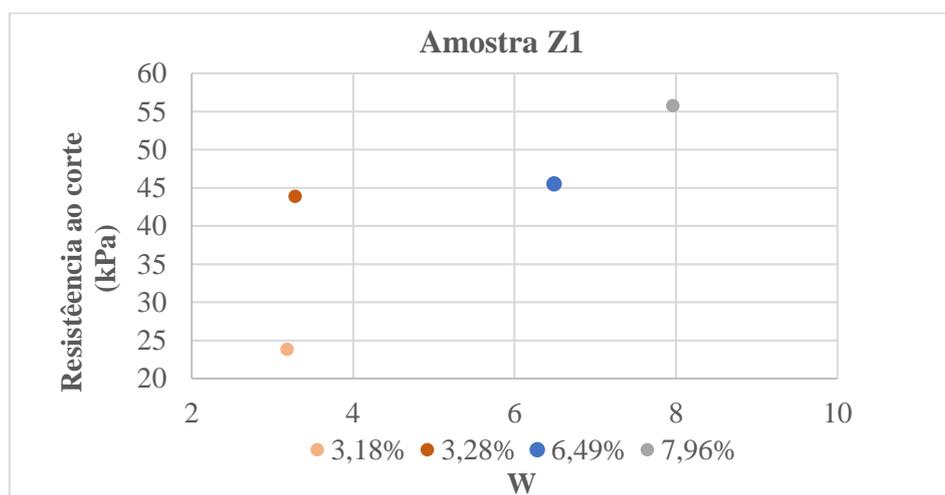


Figura 93. Variação do valor da resistência ao corte em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z1. Dados coligidos (Serrão, 2018)

Da projeção acima (fig. 93) há que registar alguns aspetos diferentes dos anteriormente indicados nos casos das amostras do conjunto A. Ora vejamos, primeiro, os provetes compactados com teores em água inferiores ao ótimo, de 3,18% e 3,28%, apresentaram valores de resistência de, respetivamente, de 23,87 e 43,88 kPa. Segundo, o provete compactado com teor em água próximo do ótimo (6,49%) apresentou valor de resistência de 45,52 kPa, valor relativamente maior que os valores dos provetes que o antecedem, e por fim, no provete compactado com teor em água superior ao ótimo (7,96%), o valor de resistência medido foi de 55,76 kPa, claramente, o mais elevado de todos os valores medidos.

Assim, comparando os gráficos da resistência em análise desta amostra Z1 com o da coesão da mesma, nota-se a sua semelhança, denotando que a resistência ao corte (de pico) é mais afetada pela coesão do que pelo ângulo de atrito.

Semelhante análise é feita para a amostra Z2, cujo gráfico se apresenta a seguir (fig. 94).

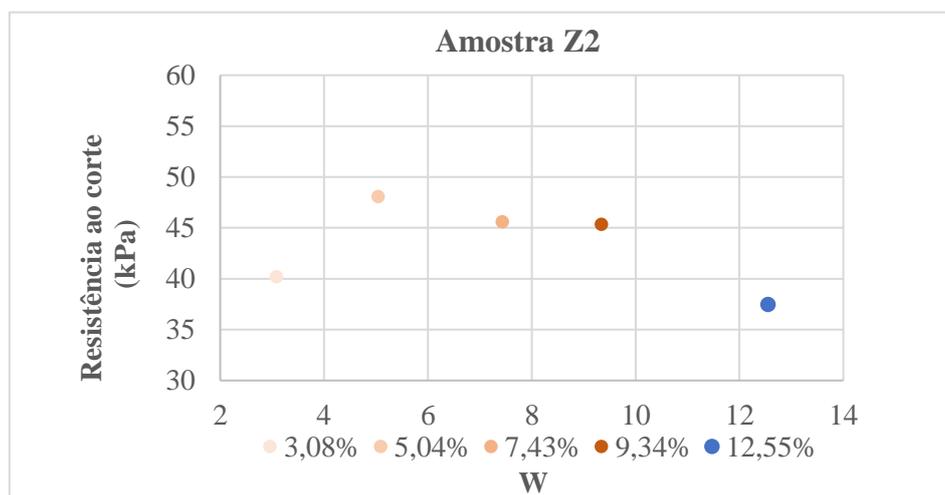


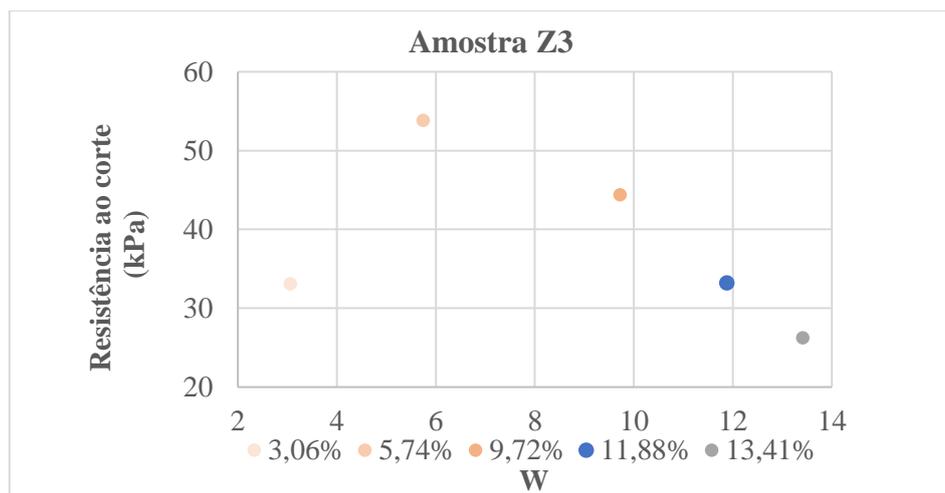
Figura 94. Variação do valor da resistência ao corte em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z2. Dados coligidos (Serrão, 2018)

A observação do gráfico acima e a sua comparação com o gráfico relativo à coesão, nas mesmas condições de resistência máxima (de pico) são semelhantes, no que concerne à forma como os pontos se distribuem entre si, corroborando o que vem sendo dito relativamente às outras amostras, sobre a influência do valor da coesão no valor da resistência.

Relativamente a esta amostra, entre os provetes compactados com teores em água de 3,08% e de 5,04%, verifica-se um aumento do valor da resistência que passa dos 40,20 kPa para 48,07 kPa. A seguir a este aumento, assiste-se à diminuição da resistência com o aumento do teor em água de compactação, entre teores de 5,04% para 12,55%, onde a resistência assume valores de 48,07 e 37,48 kPa, respetivamente.

Esta percepção é de extrema relevância na medida em que ao comparar estes resultados como um todo, ou seja, como provetes compactados em condições inferiores ao ótimo, percebe-se que estes valores de resistência se mantêm elevados comparativamente ao valor do provete compactado com teor em água ótimo.

Na figura 95, apresenta-se também o gráfico da tensão de corte (de pico) versus teor em água, elaborado com base nos resultados obtidos com os dados coligidos da amostra Z3.



. Figura 95. Variação do valor da resistência ao corte em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z3. Dados coligidos (Serrão, 2018)

A comparação entre a apresentação gráfica dos resultados da resistência e da coesão, confirma o referido para as demais amostras, no que respeita à semelhança com o gráfico da coesão.

Tal como aconteceu anteriormente, nesta amostra, com base nos teores em água de compactação usados, excetuando a evolução que se verifica entre os dois primeiros provetes compactados com teores em água de 3,06% e de 5,74%, cujas resistências foram, respetivamente, de 33,08 e 53,84 kPa os valores da resistência diminuem com o aumento do teor em água de compactação. Veja-se que a partir do provete compactado com teor em água de 5,74%, a resistência decresce dos 53,84 kPa para 26,24 kPa, valor que se regista no provete compactado com teor em água superior ao ótimo (13,41%).

4.4.3.1.3.2. Resistência ao corte residual

Importa agora analisar também a resistência ao corte residual.

Como se poderá notar, tal como se observou na apreciação da resistência máxima (de pico), a tendência de evolução da resistência residual com a variação do teor em água de compactação, está em consonância com a observada na análise da variação da coesão residual em função do teor em água.

À semelhança do que foi feito atrás, apresentam-se os resultados obtidos para todas as amostras em análise, começando pelas da série A.

No gráfico que se segue (fig. 96), constam os resultados correspondentes a amostra A1.

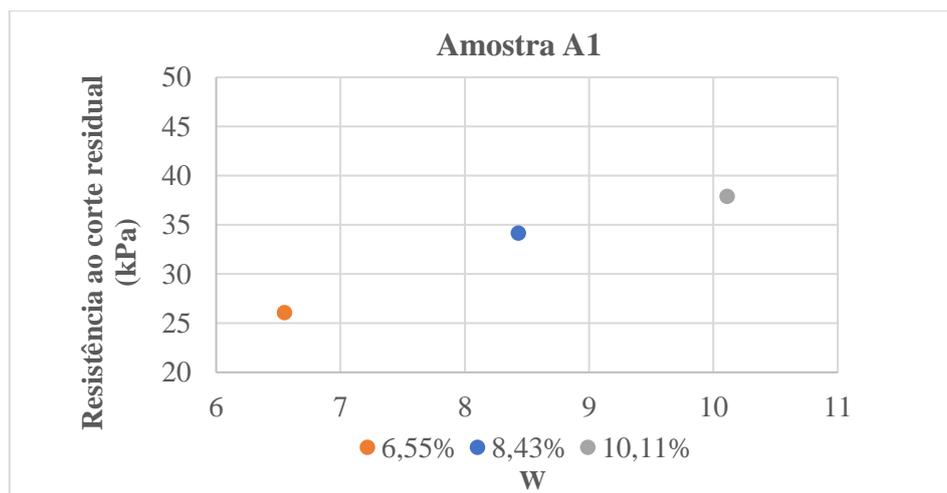


Figura 96. Variação do valor da resistência ao corte residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A1

Pela projeção dos pontos, observa-se que os provetes compactados com teores em água inferior ao ótimo (6,55%) e com teor em água próximo do ótimo (8,43%) apresentam valores de resistência ao corte, respetivamente, de 26,09 e de 34,17 kPa, ao passo que ao provete compactado com teor em água superior ao ótimo (10,11%) corresponde o maior valor de resistência ao corte registado, 37,91 kPa. Em comparação com a resistência ao corte (de pico), nota-se uma diferença na forma como estes dados evoluem com o teor em água de compactação.

Procedeu-se do mesmo modo para os dados relativos à amostra A2.

No gráfico que se segue (fig. 97), apresentam-se os resultados correspondentes à amostra A2, de resistência ao corte residual.

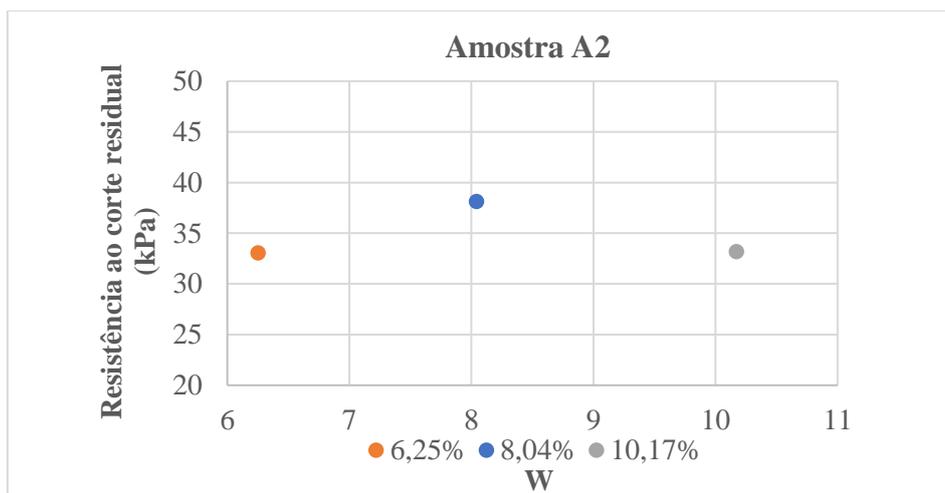


Figura 97. Variação do valor da resistência ao corte residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A2

Nesta amostra, a variação da resistência em função do valor do teor em água do solo, difere da observada no caso da amostra A1, anteriormente analisada. Difere ainda mais da evolução observada na resistência ao corte de pico (amostra A2), onde a resistência diminuía com o aumento do teor em água até o teor em água próximo do ótimo e a partir daí, aumentava com a continuação do aumento do teor em água. Nesta amostra A2, a resistência aumenta com o aumento do teor em água, passando dos 33,05 kPa, no provete compactado com teor em água de 6,25% para 38,12 kPa, no provete compactado com teor em água de 8,04%, diminuindo a partir deste ponto.

Relativamente à amostra A3, apresentam-se igualmente os resultados correspondentes da resistência versus teor em água.

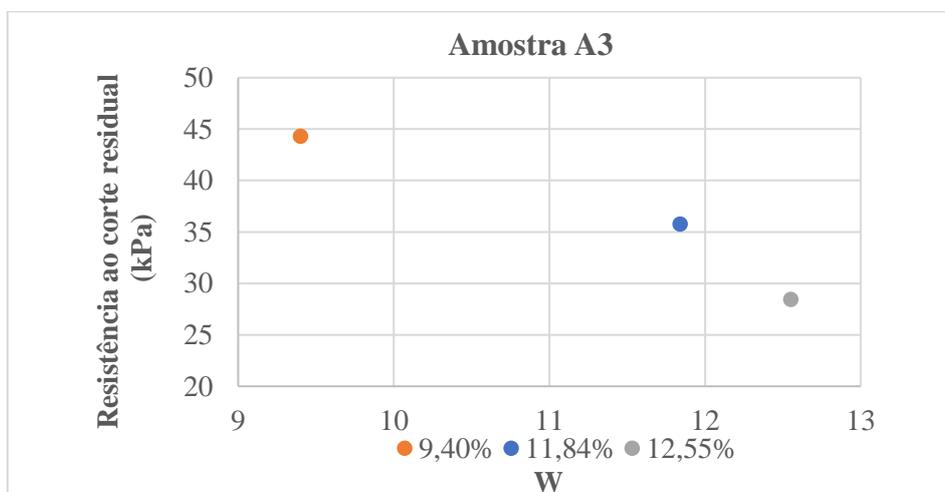


Figura 98. Variação do valor da resistência ao corte residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra A3

Pelo gráfico acima apresentado (fig. 98), o alinhamento dos valores sugere diminuição da resistência com o aumento do teor em água de compactação. Nota-se um decréscimo dos 44,28 kPa, valor registado no provete compactado com teor em água inferior ao ótimo (9,40%) para 35,77 kPa, registado no provete compactado com teor em água próximo do ótimo (11,84%), bem como, para 28,42 kPa, no provete compactado com teor em água superior ao ótimo (12,55%). Estes resultados se comparados com os obtidos para mesma amostra, referentes à resistência ao corte máxima (de pico), mostram tendência de variação diferente.

Relativamente às amostras da série Z, são apresentados seguidamente os gráficos obtidos para a resistência ao corte residual versus teor em água de compactação.

Assim, na figura 99, apresentam-se os resultados da amostra Z1.

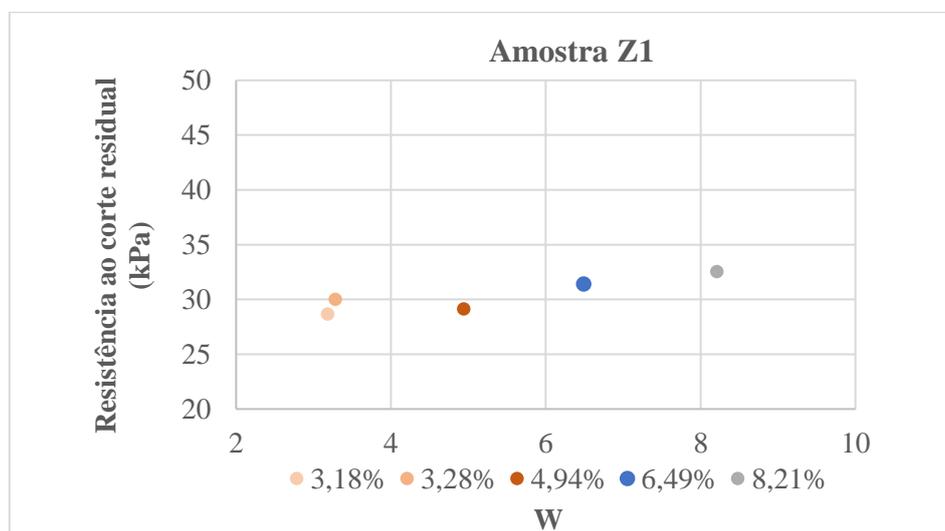


Figura 99. Variação do valor da resistência ao corte residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z1. Dados coligidos (Serrão, 2018)

Pela projeção dos pontos, observa-se uma tendência geral crescente dos valores da resistência em função do teor em água de compactação. Regista-se, no entanto, uma ligeira exceção a esta tendência, protagonizada pelo segundo ponto, relativo ao provete compactado com teor em água de 3,28%.

Semelhante análise é feita para a amostra Z2, a que se apresenta a seguir (fig. 100).

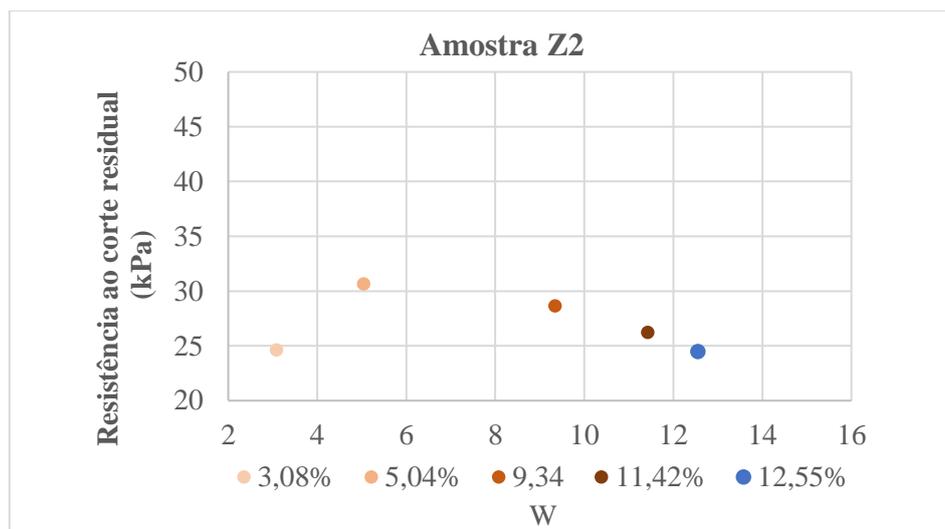


Figura 100. Variação do valor da resistência ao corte residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z2. Dados coligidos (Serrão, 2018)

Relativamente a esta amostra, observa-se um aumento da resistência ao corte até o teor em água de 5,04% e a partir daí, valores decrescentes da resistência com o aumento do teor em água de compactação.

Apesar do ligeiro incremento da resistência ao passar dos 24,64 kPa, no provete compactado com teor em água de 3,08%, para 30,65 kPa, no compactado com teor em água de 5,04%, a tendência de evolução dos valores da resistência altera-se passando a diminuir até ao valor de 24,48 kPa, registado no provete compactado com teor em água próximo do ótimo (12,55%).

Para finalizar, na figura 101, apresenta-se o gráfico da tensão de corte versus teor em água, elaborado com base nos resultados obtidos com os dados coligidos de Serrão (2018) da amostra Z3.

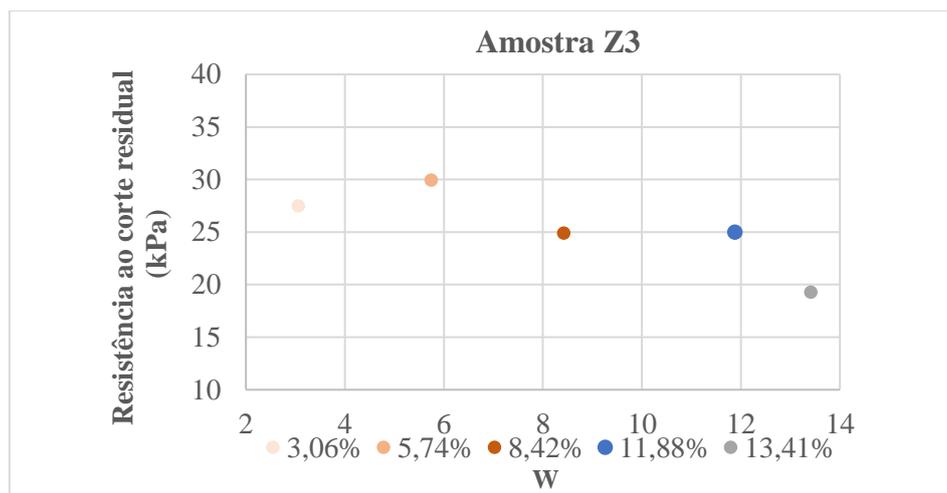


Figura 101. Variação do valor da resistência ao corte residual em função da variação do teor em água de compactação, em provetes da amostra Z3. Dados coligidos (Serrão, 2018)

Pelo gráfico acima apresentado (fig. 101), o alinhamento dos valores sugere variação irregular da resistência ao corte residual, com o aumento do teor em água de compactação. Após um aumento do valor da resistência entre o provete compactado com 3,06% de água (27,49 kPa), e o compactado com teor em água de 5,74% (29,96 kPa) nota-se um decréscimo da resistência desde daquele valor até aos valores de resistência de 24,89 e 24,99 kPa, correspondentes aos pontos compactados com teor em água de, respetivamente, 8,42% e 11,88%. A partir do teor em água próximo do ótimo (11,88%) volta-se a registar decréscimo mais acentuado da resistência com o aumento do teor em água.

4.4.3.1.3.3. Análise geral da resistência ao corte

Das análises acima realizadas, foi possível ver que a variação da resistência toma assume diversas tendências em função do teor em água de compactação. A resistência tanto pode aumentar como diminuir com o aumento do teor em água.

Nota-se ainda que, em alguns casos, a tendência de variação da resistência em função do teor em água não é idêntica quando comparamos dados de resistência de pico com dados de resistência residual.

Também foi possível concluir que para as amostras estudadas nesta investigação, a coesão é o parâmetro que mais influencia a resistência ao corte.

CAPÍTULO 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os resultados apresentados e discutidos anteriormente no capítulo 4, referente à apresentação e discussão de resultados, tecem-se agora algumas das mais relevantes considerações.

Os resultados da compactação das amostras obtidos comprovam, mais uma vez, a influência que a água tem na baridade seca. Esta baridade do solo aumenta com o aumento do seu humedecimento até atingir a baridade teórica máxima com o alcance do teor em água ótimo. Passado este teor, a baridade reduz com o aumento da humidade do solo.

Do estudo da variação da resistência dos solos compactados, em função da variação do teor em água de compactação, podem-se tecer as seguintes considerações:

- Decorrente da compressão uniaxial dos provetes em laboratório, conclui-se que a água tem sim influência na variação da sua resistência à compressão, tal como acontece com a compactação. Foi possível confirmar com o estudo realizado nas amostras do conjunto A, que a tendência dessa variação é idêntica à observada na compactação. A resistência aumenta com o aumento do teor em água até ao teor em água ótimo e reduz a partir daí com a continuação do aumento do teor em água de compactação.
- Ainda sobre a resistência à compressão simples, foi possível concluir que os valores obtidos neste estudo contrariam o referido por Faria (2007), uma vez que no seu trabalho generaliza que a resistência à compressão simples dos solos decresce sempre com o aumento do teor em água.
- A resistência ao punçoamento dos solos também varia com a variação do teor em água de compactação. Em alguns solos o seu incremento acontece tal como acontece com a baridade seca e com a resistência à compressão simples. No entanto, noutros esta tendência é diferente.
- Estes resultados (parte deles) permitiram concluir que contrariam o referido por Caputo (1988), uma vez que segundo este autor, é esperado que a compactação no ramo seco conduza a obtenção de valores mais elevados de resistência à penetração em comparação com os obtidos no ramo húmido.
- Ainda sobre o punçoamento (recuperação de solos após penetração), tendo em conta os resultados obtidos neste estudo, foi possível concluir que as amostras do conjunto A, ao

contrário do que acontece com as amostras do conjunto Z, tendem a recuperar-se após o carregamento sofrido para uma penetração de 12,5 mm, exibindo alguma elasticidade, facto que nos permite ponderar a existência de minerais argilosos na sua composição.

- Relativamente à variação da resistência ao corte dos solos compactados em função do teor em água, verificamos que esta assume tendências diferentes para solos diferentes.
- Percebe-se ainda que o valor da resistência ao corte é mais influenciado pelo valor da coesão do que pelo valor do ângulo de atrito.

Após obtenção dos resultados, sua apresentação e discussão, notou-se que boa parte das amostras apresentaram comportamentos similares, no entanto, outras apresentaram um comportamento diferente. Conforme é explicado ao longo do trabalho, há necessidade de se complementar este estudo com mais dados, nomeadamente:

- Determinação da distribuição granulométrica da fração fina que cada amostra contém.
- Determinação da composição mineralógica, em particular da composição mineralógica da fração argila (partículas de dimensão $< 0,002$ mm) por DRX.
- Realizar mais ensaios para determinação dos diversos tipos de resistência, nas mesmas amostras, e noutras, com provetes compactados com outros valores de teor em água, de modo a ser possível detalhar e completar as curvas de tendência aqui apresentadas.

Na mesma senda, outro trabalho futuro que seria interessante realizar é a determinação da resistência ao punçoamento com possibilidade de registo contínuo do carregamento, de modo a determinar o valor exato do momento da rotura, o que não é atualmente possível com o equipamento existente no laboratório.

6. Referências bibliográficas

Albuquerque, P (2003). Fundações e obras de Terra.

Alvarez, N. G. (2020). *Avaliação laboratorial de misturas de solo-cimento com baixo teor de cimento* (Dissertação de mestrado). Universidade Nova de Lisboa.

Budhu, M. (2010). *Soil Mechanics and Foundations*. (3rd ed). Jonh Wiley & Sons, INC.

Caputo, H. P. (1988). *Mecânica dos solos e suas aplicações*. (6^a ed). LTC.

Cordeiro, F & Zampieri, L. (2018). *Estudo do comportamento mecânico de um solo de baixa resistência da região de concórdia, sc, estabilizado com cal*. Conhecimento em Construção, Joaçaba, v. 6, 113-124. <https://portalperiodicos.unoesc.edu.br/conheconstr>

Correia, A., Neves, J., Fortunato, E & Parente, M. (2021). *A geotecnia nos pavimentos e vias-férreas e prospetivas para a era digital*. Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Geotecnia n° 152, 113-141. <https://doi.org/10.14195/2184-83941524>

Couto, a. F. C. (2018). *Propriedades mecânicas de misturas de solo ligado com cimento com diferentes teores em água* (Dissertação de mestrado). Universidade Nova de Lisboa.

Cristelo, N. (2001). *Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Cruz, M. L. S. (2004). *Novas Tecnologias da Aplicação de Solo-Cimento* (Dissertação de mestrado). Universidade do Minho.

Das, B. M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering*. (7th ed). Cengage Learning.

Faria, F. X. C. C. L. (2007). *Influência da molhagem após Compactação no Comportamento de um Aterro da Auto-Estrada A10 (BRISA)* (Dissertação de mestrado). Universidade Técnica de Lisboa.

Faria, P & Gomes, C. (2004). *Influência da Humidade de Compactação na Variação dos Parâmetros que Expressam a Resistência dos Solos* [Influence Of Soil Moisture Compaction On The Parameters That Express Soil Resistane]. Geo - Artigos em Livros de Actas/Proceedings (397- 402). Sociedade Portuguesa de Geotecnia; Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica; Secção Autónoma de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. <http://hdl.handle.net/10174/21184>

Faria, P. (2005). *Propriedades composicionais e geotécnicas de solos argilosos em obras rodoviárias* (Tese de doutoramento). Universidade de Aveiro.

Ferreira, F. M. L. (2015). *Caracterização Geotécnica de Solos de Alta Montanha* (Dissertação de mestrado). Universidade da Beira interior.

Head, K. H. (1994). *Manual of soil laboratory testing*. (1st ed). Halsted Press.

Júnior, I. P. S. (2020). *Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Silto-Arenoso na região de Bragança: Ensaio de Corte Direto* (Dissertação de mestrado). Instituto Politécnico de Bragança.

Luciano, R., Albuquerque, J., Costa, A., Batistella, B & Warming, M. (2012). *Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no sul do Brasil*. R. Bra. Ci. Solo, 36, 1733-1744.

Maia, P. M. B. (2013). *Avaliação Estrutural de Pavimentos Rodoviários após Instalação de Infraestruturas* (Dissertação de mestrado). Universidade do Minho.

Minguens, C. M. A. (2016). *Resistência ao Corte Residual de Solos* (Dissertação de mestrado). Universidade de Coimbra.

Murthy, V. N. S. (2002). *Principles and Practice of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. (1st ed). Marcel Dekker.

Prates, M. (2018). *Manual prático de estradas*. (1^a ed).

Ribeiro, S. P. T. (2008). *Terraplanagem. Metodologia e Técnicas de Compactação* (Dissertação de mestrado). Universidade do Porto.

Rodrigues, N. (2015). *Estudo sobre o ângulo de atrito em solos graníticos residuais* (Dissertação de mestrado). Universidade da Beira Interior.

Serrão, J. (2018). *Contribuição para o estudo da influência do teor em água na resistência de solos compactados* (Dissertação de mestrado). Universidade de Évora.

Silva, A. T. A. F. (2013). *Controlo da compactação com recurso a gamadensímetro – Caso de estudo: ETAR de Castelo Branco* (Dissertação de mestrado). Universidade do Porto.

Silva, J. P. (2016). *Estudo comparativo de diversas técnicas de compactação laboratorial e suas implicações* (Dissertação de mestrado). Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

Trindade, T. P., Lima, D. C., Carvalho, C. A. B., Machado, C. C., & Pereira, R. S. (2003). *Compactação de Solos*. Anais do 6 Simpósio Brasileiro sobre Colheita e Transporte Florestal, Volume (1), <https://www.researchgate.net/publication/313703122>

Normas

L.N.E.C. E 195 (1966) – Solos. Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação. LNEC, Lisboa.

L.N.E.C. E 197 (1966) – Solos. Ensaio de compactação. LNEC, Lisboa.

L.N.E.C. E 198 (1967). Solos. Determinação do CBR. LNEC, Lisboa.

L.N.E.C. E 239 (1971) – Solos. Análise granulométrica por peneiração húmida. LNEC, Lisboa.

L.N.E.C. E 239 (1971) – Solos. Análise granulométrica por peneiração húmida. LNEC, Lisboa.

L.N.E.C. E 240 (1970) – Classificação para fins rodoviários. LNEC, Lisboa.

L.N.E.C. E 264 (1972). Solo-cimento. Ensaio de compressão. LNEC, Lisboa.

NP – 12390-3 (2009). Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes.

NP – 143 (1969) – Solos – Determinação dos limites de consistência.

NP – 1926 (2008). Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à compressão uniaxial.

NP – 84 (1965) - Solos – Determinação do teor em água.

NP – 932-2 (2002). Ensaio das propriedades gerais dos agregados. Parte 2: Métodos de redução de amostras laboratoriais.