

DM

Influência da não Saturação no Comportamento  
Mecânico de Camadas de Aterro

Eduardo César Andrade Gomes



## Influência da não Saturação no Comportamento Mecânico de Camadas de Aterro

DISSERTAÇÃO DE Mestrado

**Eduardo César Andrade Gomes**  
Mestrado em Engenharia Civil

  
UNIVERSIDADE da MADEIRA  
*A Nossa Universidade*  
www.uma.pt

setembro | 2012

A Nossa  
Universidade

Colégio dos Jesuítas  
Rua dos Ferreiros - 9000-082, Funchal

Tel: +351 291 209400  
Fax: +351 291 209410  
Email: [gabinetedaregiao@uma.pt](mailto:gabinetedaregiao@uma.pt)

# Influência da não Saturação no Comportamento Mecânico de Camadas de Aterro

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Eduardo César Andrade Gomes**

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTAÇÃO

João Paulo Martins

“A descoberta consiste em ver o que todos viram e em pensar o que ninguém pensou”

Albert SZent-Gyorg Yi



# Agradecimentos

Este espaço é dedicado a todos aqueles que contribuíram para que esta dissertação fosse possível. A todos aqui deixo o meu agradecimento sincero e em particular,

Ao professor Doutor João Martins, pela orientação prestada, pela revisão final da dissertação, pelos conselhos e por toda a disponibilidade demonstrada ao longo de todo este processo;

Ao Engenheiro Fernando Vieira, Engenheira Délia Sousa e técnicos do laboratório de geotecnia do LREC que me ajudaram nos ensaios laboratoriais, pela máxima disponibilidade e simpatia demonstrada em todo o tempo que estive no LREC;

Ao Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC), por permitir a execução dos ensaios realizados nas suas instalações;

Ao Doutor Nuno Aguiar pela disponibilidade no auxílio de introdução ao ArcGis; Por fim, e não menos importante, aos meus pais por tudo, à Ana pela paciência e motivação que me deu, e para todos os meus amigos que de algum modo me ajudaram nesta etapa da minha vida, sem eles este trabalho não seria possível;



# Resumo

Nesta dissertação pretende-se estudar a influência da não saturação de solos compactados no comportamento mecânico das camadas de aterro, nomeadamente de infraestruturas de transportes.

Os aterros são normalmente construídos através de camadas de solo compactado em condições não saturadas, cujo comportamento mecânico varia ao longo da sua extensão apesar de serem aplicadas as mesmas forças de compactação. Para tal podem ser identificadas várias explicações de forma a justificar o comportamento mecânico da camada como o tipo de solo, as alterações das condições de estado, ou seja, do índice de vazios e do teor em água. Estas variações ao longo das camadas dão origem a diferentes forças de sucção entre as partículas do solo condicionando, originando assim variações no comportamento mecânico das camadas de aterro.

O estudo conduzido no presente trabalho tem por base os resultados de ensaios in-situ realizados num aterro experimental, onde foram executadas camadas de aterro com diferentes teores em água. A partir da caracterização do comportamento mecânico e das condições de estado avalia-se a influência da não saturação das camadas. Este estudo é complementado com uma campanha de ensaios de laboratório onde se avalia a influência das condições de estado, nomeadamente o teor em água e o índice de vazios, nas forças de sucção, que estão diretamente relacionadas com o comportamento mecânico do solo compactado.

Palavras-chave: deformabilidade, sucção, compactação, aterros e solos não saturados



# Abstract

This dissertation intend the study of the influence of the instauration of the compacted soil on mechanical behaviour of landfill layers, namely in the infrastructure transports.

Landfills are typically constructed by layers of compacted soil in unsaturated conditions, whose mechanical behaviour varies along its extension despite being subject to the same compaction forces. To this end, several explanations can be identified in order to justify the mechanical behaviour of the layer such as soil type, the changes of state conditions, it means, the void ratio and water content. These variations along the layers leads to different suction forces between the soil particles which influence the mechanical behaviour of the layers of the landfill.

The study lead in this paper work is based on the results of tests experiments made in-situ in an experimental landfill, where landfill layers were performed with different water contents. From the characterization of the mechanical behaviour and also the state conditions we can assess the influence of instauration of the layers. This study is complemented by laboratory tests, which assesses the influence of state conditions, including the water content and void ratio, the suction forces that are directly related with the mechanical behaviour of compacted soil.

Keywords: deformability, suction, compaction, landfills and unsaturated soils



# Índice

<b>Capítulo 1 - Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Motivação .....</i>	1
1.2 <i>Objetivos .....</i>	2
1.3 <i>Estrutura da dissertação .....</i>	3
<b>Capítulo 2 - Comportamento mecânico dos solos não saturados .....</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Sucção.....</i>	6
2.2 <i>Influência da compactação em solos não saturados.....</i>	9
2.2.1 <i>Curvas de retenção de água no solo.....</i>	10
<b>Capítulo 3 - Caracterização mecânica das camadas de aterro .....</b>	<b>15</b>
3.1 <i>Ensaio de carga estático com placa (ECP) .....</i>	15
3.2 <i>Defletómetro de impacto ligeiro (DIP).....</i>	18
3.3 <i>“Geogauge” – Soil stiffness gauge (SSG).....</i>	20
3.4 <i>Método de teste contínuo (Portancemètre) .....</i>	22
<b>Capítulo 4 - Descrição da metodologia de análise dos resultados .....</b>	<b>27</b>
4.1 <i>Enquadramento do aterro em estudo .....</i>	27
4.1.1 <i>- Geometria .....</i>	27
4.1.2 <i>- Materiais .....</i>	28
4.2 <i>Descrição do método de análise .....</i>	30
4.2.1 <i>- Análise gráfica.....</i>	31
4.2.2 <i>- Análise espacial.....</i>	31
4.2.3 <i>- Ensaios de laboratório .....</i>	33
<b>Capítulo 5 - Análise de resultados.....</b>	<b>39</b>
5.1 <i>Ensaios de laboratório .....</i>	39
5.2 <i>Avaliação da influência da variação das condições de estado no comportamento mecânico das camadas de aterro.....</i>	42
5.2.1 <i>- Comparação dos resultados dos ensaios in-situ.....</i>	43
5.2.1.1 <i>- Análise gráfica.....</i>	43
5.2.1.1.1 <i>- Camada de 30 cm com valores de teores em água 2% inferiores ao ótimo.....</i>	43

5.2.1.1.2 - Camada de 40 cm com valores de teores em água 2% inferiores ao ótimo (40cm_w-2)	48
5.2.1.1.3 - Camada de 40 cm com valores de teores em água referentes ao ótimo (40cm_wo) .....	51
5.2.1.1.4 - Camada de 40 cm com valores de teores em água 2% superiores ao ótimo (40cm_w+2) .....	55
5.2.1.1.5 - Camada de 50 cm com valores de teores em água 2% inferiores ao ótimo.....	59
5.2.1.2 - <i>Comparação com resultados apresentados na bibliografia</i> .....	63
5.2.1.3 - Análise Espacial.....	66
5.2.1.3.1 - Análise para a camada de 30 cm com os valores de teor em água 2% inferiores ao ótimo (30cm_w-2).....	66
5.2.1.3.2 - Análise para a camada de 40 cm com os valores de teor em água 2% inferiores ao ótimo (40cm_w-2).....	71
5.2.1.3.3 - Análise para a camada de 40 cm com os valores de teor em água equivalentes ao ótimo (40cm_wo).....	73
5.2.1.3.4 - Análise para a camada de 40 cm com os valores de teor em água 2% superiores ao ótimo (40cm_w+2).....	76
5.2.1.3.5 - Análise para a camada de 50 cm com os valores de teor em água 2% inferiores ao ótimo (50cm_w-2).....	79
<b>Capítulo 6 - Conclusões e desenvolvimento futuros.....</b>	<b>83</b>
6.1 – <i>Conclusões Finais</i> .....	83
6.2 - <i>Desenvolvimentos Futuros</i> .....	86
<b>Capítulo 7 - Referências bibliográficas .....</b>	<b>87</b>
<b>Capítulo 8 - Anexos .....</b>	<b>91</b>
Anexo 1 .....	91
Anexo 2 .....	93

# Índice de Figuras

Figura 2 - Métodos do papel de filtro para a medição da sucção matricial e total (Yang et al.,2008) .....	8
Figura 2.1 - Curvas de calibração para o papel de filtro Whatman 42 (Adaptado de Bicalho et al., 2008)..8	
Figura 2.2.1- Curva de retenção típica (Vanapalli et al., 1996) .....	11
Figura 2.2.2 – Curvas de retenção de água no solo típicas para 4 solos canadianos (Vanapalli et al., 1999). .....	12
Figura 2.2.3 – Comparação das curvas de retenção para as amostras compactadas para o mesmo índice de vazios e: (a) compactada para o teor em água do lado seco do ótimo; (b) compactação para o teor em água ótimo; (c) compactação para o teor em água do lado húmido da curva de compactação (Vanapalli, et al., 1999).....	13
Figura 2.2.4 – Curvas de retenção de água para diferentes densidades constantes de uma argila siltosa de baixa plasticidade de Barcelona (Barrera, 2002). .....	14
Figura 3.1 - ECP seguindo a norma AFNOR NF P94-117-1 (2000); a) Diagrama esquemático dos ciclos de carregamento e descarregamento aplicados sobre a placa durante o ensaio; b) Apresentação do método de ensaio, (Martins, 2011). .....	16
Figura 3.2- ECP de acordo com a norma DIN 18134 (2001); a) Curva tensão – assentamento para determinação do módulo de deformabilidade, $E_{v2}$ ; b) Exemplificação do ensaio ECP; (Martins, 2011) .....	17
Figura 3.3 - (a) DIP (Martins, 2011); (b) Componentes do DIP (Adam and Adam, 2003) .....	19
Figura 3.4- Humbolt Stiffness Gauge: (a) Aspeto geral; (b) detalhe do anel rígido (Martins,J, 2011) .....	21
Figura 3.5 – Esquema de funcionamento do Geogauge (Fortunato, 2005) .....	22
Figura 3.5 - Equipamento Portancemètre; a) aspeto geral; b) Pormenor da roda vibrante; (Martins, 2011) .....	23
Figura 3.6 - Esquema de Principio de funcionamento do "Portancemètre" (Fortunato, 2005).....	23
Figura 3.7- Aspeto dos gráficos apresentados no monitor do Portancèmetre, (Fortunato, 2005).....	25
Figura 4.1 – Representação do aterro experimental descrito com dimensões de 50x6 m <sup>2</sup> (Martins, 2011) .....	28
Figura 4.2 – a) Camada de areia argilosa (SC); b) Camada de agregado esmagado (CA31,5) sobre a camada de areia argilosa; (Martins, 2011). .....	29
Figura 4.3 – Curva granulométrica da areia argilosa (SC), (Martins, 2011). .....	29
Figura 4.4 – Resultados dos ensaios de identificação dos materiais, adaptado de (Martins, 2011).....	30
Figura 4.4 – Balança analítica com resolução de 4 casas decimais. ....	34
Figura 4.5 – Esquartelamento da amostra; a) Material a esquartelar; b) Material esquartelado; .....	34
Figura 4.6 – Amostra imediatamente após a mistura da água; w=8,5% .....	35
Figura 4.7 – Prensa hidráulica; a) Prensa hidráulica antes da compactação; b) Prensa hidráulica durante a compactação;.....	35

Figura 4.8 – Molde utilizado para a realização dos provetes. ....	36
Figura 4.9 – Provede depois da compactação.....	36
Figura 4.10 – Isolamento e armazenamento dos provetes; a) Isolamento do provede com película aderente; b) Provedes finais em repouso na sala com temperatura controlada .....	37
Figura 5.1 – Tabela com os dados das condições de estado aplicadas a cada provede.....	40
Figura 5.2 – Sucção versus grau de saturação para todos os índices de vazios ensaiados, e representação da curva apresentada em Martins (2011).....	41
Figura 5.3 – Correlações apresentadas entre os vários ensaios in-situ para todos os níveis de energia com os dados agrupados por intervalos de teor em água: a) ECP-DIP; b) DIP-SSG.....	44
Figura 5.4 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de índice de vazios; a)ECP-DIP; b) DIP-SSG .....	45
Figura 5.5 - Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de grau de saturação; a)ECP-DIP; b) DIP-SSG .....	46
Figura 5.6 – Correlações apresentadas entre os vários ensaios in-situ para o último nível de energia de compactação (12 passagens) com os dados agrupados por intervalos de teor em água: a) PORT-SSG; b) DIP-SSG .....	47
Figura 5.7 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de índices de vazios; a) PORT-SSG; b) DIP-SSG. ....	47
Figura 5.8 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de grau de saturação; a) PORT-SSG; b) DIP-SSG. ....	48
Figura 5.9 – Correlações apresentadas entre os vários ensaios in-situ para todos os níveis de energia com dados agrupados por intervalos de teor em água: a) PORT-DIP; b) DIP-SSG.....	49
Figura 5.10 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de valores de índice de vazios; a) PORT-DIP; b) DIP-SSG. ....	50
Figura 5.11 – Correlações entre ensaios com dados agrupados por intervalos de grau de saturação; a) PORT-DIP; b) DIP-SSG.....	50
Figura 5.12 – Correlações apresentadas entre os ensaios in-situ para todos os níveis de energia com os dados agrupados por intervalos de teor em água: a) DIP-SSG; b) PORT-DIP.....	52
Figura 5.13 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de índice de vazios; a) DIP-SSG; b) PORT-DIP.....	52
Figura 5.14 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de grau de saturação; a) DIP-SSG; b) PORT-DIP.....	53
Figura 5.15 – Correlações apresentadas entre os vários ensaios in-situ para o último nível de energia de compactação (12 Passagens) com os dados agrupados por intervalos de teor em água: a) PORT-DIP; b) DIP-SSG.....	54
Figura 5.16 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de índice de vazios; a) PORT-DIP; b) DIP-SSG.....	55

Figura 5.17 – Correlações entre os ensaios com os dados agrupados por intervalos de grau de saturação; a) PORT-DIP; b) DIP-SSG.....	55
Figura 5.18 – Correlações apresentadas entre os vários ensaios in-situ para todos os níveis de energia com os dados agrupados por intervalos de teor em água: a) ECP-SSG; b) PORT-DIP.....	56
Figura 5.19 – Correlações entre os ensaios com os dados agrupados por intervalos de índice de vazios; a) ECP-SSG; b) PORT-DIP. ....	57
Figura 5.20 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de valores de grau de saturação; a) ECP-SSG; b) PORT-DIP. ....	57
Figura 5.21 – Correlações apresentadas entre os vários ensaios in-situ para o último nível de energia de compactação (12 Passagens); a) ECP-SSG; b) PORT-SSG. ....	58
Figura 5.22 – Correlações obtidas entre os ensaios in-situ para os resultados de todos os níveis de energia: a) PORT-SSG; b) DIP-SSG. ....	59
Figura 5.23 – Correlações entre os ensaios com os dados agrupados por intervalos de índices de vazios: a) PORT-SSG; b) DIP-SSG. ....	60
Figura 5.24- Correlações apresentadas entre os vários ensaios in-situ para o último nível de energia (12 Passagens) com os dados agrupados por intervalos de teor em água: a) PORT-DIP; b) PORT-SSG. 61	61
Figura 5.25 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de índice de vazios; a) PORT-DIP; b) PORT-SSG. ....	62
Figura 5.26 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de grau de saturação; a) PORT-DIP; b) PORT-SSG. ....	62
Figura 5.27 - Comparação da correlação obtida através dos resultados dos ensaios in-situ com as correlações apresentadas por vários autores; a) ECP e DIP; b) ECP-SSG.....	65
Figura 5.28 – Mapa referente aos dados de: a) teor em água; b) índice de vazios; c) grau de saturação, para o nível de energia equivalente as 12 passagens do cilindro na compactação.....	67
Figura 5.29 – Mapas referentes aos dados obtidos através dos ensaios: a) ECP; b) DIP; c) SSG; d) PORT, para o nível de energia equivalente as 12 passagens do cilindro na compactação.....	68
Figura 5.30 – Sobreposição de um mapa de Iso-linhas referente aos dados do índice de vazios sobre o mapa referente aos resultados obtidos através do ensaio ECP para o último nível de energia de compactação (12 passagens). ....	69
Figura 5.31 – Sobreposição de mapas de Iso-linhas referente aos valores dos: a) teores em água; b) graus de saturação; sobre o mapa representativo dos resultados apresentados pelo ensaio SSG, para o último nível de energia de compactação. ....	70
Figura 5.32 – Mapa referente aos dados de: a) teor em água; b) índice de vazios; c) grau de saturação, para o nível de energia correspondente as 12 passagens do cilindro na compactação.....	71
Figura 5.33 – Mapas representativos dos resultados obtidos pelos ensaios; a) ECP; b) SSG; c) PORT, para o último nível de energia de compactação (12 passagens) .....	72
Figura 5.34 – Mapa referente aos dados de; a) teor em água; b) índice de vazios; c) grau de saturação, para o último nível de energia de compactação (12 passagens). ....	74

Figura 5.35 – Mapa referente aos dados apresentados pelo ensaio; a) ECP; b) DIP; c) SSG; d) PORT, para o nível de energia equivalente as 12 passagens do cilindro na compactação. ....	75
Figura 5.36 – Sobreposição do mapa de iso-linhas referente aos dados de teor em água sobre os mapas relativos aos dados dos ensaios in-situ: a) ECP; b) DIP, para os dados referentes ao último nível de energia de compactação. ....	76
Figura 5.37 – Mapa referente aos dados de: a) teor em água; b) índice de vazios; c) grau de saturação, para o último nível de energia de compactação (12 passagens). ....	77
Figura 5.38 – Mapa referente aos dados obtidos através do ensaio; a) ECP; b) SSG; c) PORT, para o último nível de energia de compactação (12 passagens). ....	78
Figura 5.39 – Mapas referentes aos dados de: a) teor em água; b) Índice de vazios; c) grau de saturação, para o nível de energia equivalente as 12 passagens do cilindro na compactação. ....	79
Figura 5.40 – Mapa referente aos dados obtidos através do ensaio; a) ECP; b) DIP; c) SSG; d) PORT, para o nível de energia equivalente as 12 passagens do cilindro na compactação. ....	81
Figura 5.41 – Sobreposição de um mapa de Iso-linhas referente aos dados de grau de saturação sobre o mapa referente aos resultados obtidos através do ensaio DIP, para o nível de energia correspondente as 12 passagens. ....	82
Figura 5.42 – Sobreposição do mapa referente aos dados do índice de vazios sobre o mapa referente aos resultados obtidos pelo ensaio SSG para o nível de energia de compactação correspondente as 12 passagens. ....	82

# Simbologia e notações

ASTM – American society for testing and Materials

CETE – Center d'Études Techniques de l'Équipement

DIP – Defletómetro de impacto ligeiro

E – Módulo de deformabilidade

ECP – Ensaio de carga em placa

e – Índice de vazios

FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia

GC – Grau de compactação

g- Aceleração gravítica

IDW – Inverse Distance Weighted

K – Rigidez

M – Massa

MCSC – Medidor de capacidade de suporte contínuo

PORT – Portancèmetre

R – Raio

$R^2$  – Coeficiente de determinação

REFER – Rede Ferroviária Nacional

$u_a$  - Pressão do ar nos poros do solo

$u_w$  – Pressão da água nos poros do solo

S – Sucção

Sr – Grau de saturação

SSG – Soil stiffness gauge

SC – Areia Argilosa

$\Psi$  – Sucção total

$\nu$  - Coeficiente de Poisson

$\delta_c$  – Deslocamento

$\sigma$  - Tensão aplicada

$\sigma_{\text{máx}}$  – Tensão máxima

$\omega$  – Teor em água

$\Gamma_b$ - Aceleração vertical da massa

$\gamma_d$  – Peso volúmico seco

# Capítulo 1 - Introdução

## 1.1 Motivação

O presente trabalho consiste na análise da influência das condições de estado, nomeadamente o teor em água e o índice de vazios no comportamento mecânico de camadas de aterro. Para tal foi utilizado o caso de estudo apresentado por Martins (2011), referente a um aterro experimental construído perto da nova linha férrea entre “Sines” e “Caia”, próximo da “Casa Branca – Évora”, no âmbito do projeto de investigação nacional POCI/ECM /61114/004, intitulado de “Interação faixa solo-via férrea para comboios de alta velocidade”, financiado pela Fundação para Ciência e Tecnologia (FCT).

O comportamento estrutural de aterros de vias rodoviárias e ferroviárias é fortemente afetado pelas condições de compactação. A maioria dos aterros que servem de suporte aos projetos de vias de comunicação é construída sobre materiais compactados tipicamente em condições não saturadas, durante a fase de execução e muitas vezes durante a vida útil do projeto. Em projeto é comum indicar que sejam tomadas medidas no sentido de manter as condições não saturadas dos solos, porque estas promovem propriedades favoráveis de resistência e deformabilidade. No entanto um solo em condições de não saturação apresenta um fenómeno denominado por sucção, que influencia o seu comportamento hidro -mecânico. O comportamento hidromecânico é influenciado pelas condições de compactação, logo o fenómeno da sucção assume grande importância no estudo do comportamento mecânico de camadas de aterro em condições de não saturação do solo.

A compactação de um aterro é geralmente realizada por cilindros constituídos por rolos vibratórios onde são aplicadas frequências e amplitudes de vibração constantes em que

o operador escolhe a velocidade de compactação ao longo da camada. No entanto um certo número de passagens com a mesma amplitude, frequência e velocidade não garante a homogeneidade da camada compactada. Para tal são apresentadas várias causas como, as propriedades dos materiais, rigidez das camadas subjacentes, o teor em água da camada.

Apesar dos parâmetros de estado permitirem determinar se foi alcançada ou não a compactação desejada, estas não permitem controlar os valores das características normalmente consideradas na concepção, como é o caso do módulo de deformabilidade. O módulo de deformabilidade é normalmente avaliado através dos resultados apresentados pelos ensaios de carga em placa (ECP). Recentemente têm sido desenvolvidos outro tipo de ensaios que visam a obtenção deste parâmetro, nomeadamente o Geogauge (SSG), o defletómetro de impacto ligeiro (DIP), e o ensaio Portancèmetre (PORT). Trata-se de ensaios mais expeditos que visam uma melhor caracterização mecânica das camadas de aterro promovendo a qualidade de construção, mas carecem de calibração. Assim as correlações entre resultados obtidos através destes ensaios, bem como a comparação com as correlações obtidas por outros autores constituem um contributo para a validação destes ensaios.

## 1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é investigar a influência das condições de estado, nomeadamente o teor em água e o índice de vazios no comportamento mecânico de camadas de aterro. Será realizada através de investigações laboratoriais e de campo. Constituir um contributo para a validação de novos ensaios de controlo da compactação in-situ que são recentes no mercado, e ainda verificar a fiabilidade de uma análise espacial realizada através de dados obtidos por ensaios pontuais realizados in-situ para o estudo do comportamento mecânico de camadas de aterro.

Para as investigações de campo serão utilizados os resultados dos ensaios in-situ apresentados por Martins (2011), em que para a sua obtenção foram realizadas varias campanhas de ensaios, para os diferentes níveis de energia correspondentes ao número de passagens do cilindro na compactação.

As investigações realizadas em laboratório têm como objetivo avaliar a influência apresentada pelo índice de vazios e pelo teor em água nos resultados de medição de sucção, para tal serão realizadas campanhas de ensaios, cada uma com um índice de vazios fixo sendo para cada provete aplicado um teor em água diferente. Serão realizadas três campanhas semelhantes para índices de vazios fixos diferentes, pretendendo-se cobrir a gama de valores de campo.

Através dos resultados apresentados pelos ensaios in-situ em Martins (2011) será realizada uma análise espacial, que consiste na representação espacial realizada por interpolação através dos dados dos ensaios in-situ, e comparação dos resultados absolutos obtidos apresentados graficamente, com o objetivo de se verificar a fiabilidade duma análise deste género para o tipo de avaliação do comportamento mecânico ao longo da extensão da superfície em estudo.

### 1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se organizada por capítulos onde no presente Capítulo 1 “**Introdução**” efetua-se um enquadramento geral do trabalho, apresentam-se os objetivos propostos, e é realizada uma breve descrição temas que serão abordados em cada um dos capítulos subsequentes.

No Capítulo 2 “**Comportamento mecânico dos solos não saturados**” são apresentados os conceitos teóricos relativamente ao comportamento dos solos não saturados, e respetiva influência das condições de estado no comportamento das camadas de aterro que servirão de base a fundamentação dos resultados obtidos. Ainda neste capítulo é descrita a definição do fenómeno da sucção e método utilizado neste trabalho para a sua determinação.

No Capítulo 3 “**Caracterização mecânica das camadas de aterro**” são descritas as características encontradas em camadas de aterro nomeadamente em camadas de aterros utilizadas em projetos de estradas e vias férreas. Os ensaios de controlo de compactação (ECP, DIP, SSG, PORT) são descritos ao longo deste capítulo onde também são

apresentadas correlações entre os resultados dos vários ensaios encontrados na bibliografia.

No Capítulo 4 “**Descrição da metodologia de análise dos resultados**” é descrito a localização do aterro, a sua geometria, o material e suas condições de estado apresentadas pelos ensaios de identificação realizados. Também é apresentada a curva granulometria correspondente ao material de areia argilosa em estudo no presente trabalho. É realizada uma descrição das metodologias que foram utilizadas nas duas análises de resultados apresentadas no capítulo 5, tal como o software utilizado e o seu princípio de funcionamento. Ainda neste capítulo é apresentado o procedimento experimental dos ensaios de sucção realizados de acordo com o método do papel de filtro em laboratório.

No Capítulo 5 “**Análise de resultados**” são apresentados os resultados obtidos através da análise gráfica e espacial e respetivo comentário de todos os resultados. Ainda são apresentados os resultados referentes aos ensaios realizados em laboratório e apresentada a curva característica do solo obtida através dos ensaios laboratoriais.

No Capítulo 6 “**Conclusões e desenvolvimentos futuros**” faz se uma síntese de todas as conclusões que decorreram do âmbito desta dissertação e são sugeridos futuros projetos que conduzam a um maior aprofundamento de questões surgidas durante este trabalho.

## Capítulo 2 - Comportamento mecânico dos solos não saturados

Neste capítulo será feita uma alusão ao comportamento dos solos não saturados, onde serão abordadas algumas propriedades, como a influência do teor em água e do índice de vazios no comportamento mecânico dos solos não saturados, o fenómeno da sucção e curvas de retenção dos solos.

Os solos são sistemas trifásicos compostos por partículas sólidas, água e ar. Os espaços existentes entre as partículas sólidas são designados por vazios, os quais podem estar totalmente preenchidos por água, designando-se por solo saturado, ou pelo contrário, estes vazios podem não conter água passando-se a designar por solo seco. O solo não saturado, correntemente denominado por parcialmente saturado, é originado por uma situação intermédia das designadas anteriormente, ou seja, os vazios são ocupados simultaneamente por ar e água. Neste caso, existe um fenómeno denominado por sucção, o qual desempenha um papel fundamental sobre os aspetos hidromecânicos do material (Fredlund and Rahardjo, 1993).

Um solo pode tornar-se não saturado através de várias formas, a mais frequente em grande parte das obras geotécnicas é denominada por compactação. A compactação por definição consiste num processo de aplicação repetida de cargas sobre o solo na qual conduz a uma redução do volume e conseqüente diminuição do índice de vazios (Santos, 2008). No processo de compactação é impossível a expulsão da totalidade do ar dos vazios, ficando sempre algum ar preso entre as partículas sólidas constituintes do solo. Posto isto, um solo após a compactação é um solo não saturado (Reis, 2010).

Os aspetos mecânicos de solos em condições saturadas são regidos pelas tensões efetivas de Terzaghi, ou seja quando o solo é carregado, este deforma-se e em seguida é gerada uma força contrária de forma a equilibrar a carga. Embora o solo saturado seja

constituído por conjunto de solo e poros de água, estes últimos não desempenham um papel fundamental no comportamento mecânico porque a água migra dentro do solo de forma a se ajustar as condições impostas. No entanto nos solos em condições não saturadas o espaço dos poros é ocupado por ar e água, onde a sucção desempenha um papel fundamental no comportamento hidromecânico que por sua vez é influenciado pelas condições de compactação (Martins, 2011).

## 2.1 Sucção

A sucção nos solos pode ser definida como estado da energia livre da água no solo (Fredlund and Rahardjo, 1993). A sucção total ( $\psi$ ) do solo pode ser dividida em duas componentes, sucção matricial ( $u_a - u_w$ ) e sucção osmótica ( $\pi$ ), sendo apresentada pela Eq.2.

$$S = (u_a - u_w) + \pi \quad \text{Eq.2}$$

Onde:

$u_a$  – Pressão do ar nos poros do solo;

$u_w$  – Pressão da água nos poros do solo;

De acordo com Fredlund and Rahardjo (1993), a sucção osmótica é relacionada com os sais existentes na água retida nos poros do solo, e é responsável por alterações mecânicas se ocorrer mudanças na composição química da água capilar, enquanto a sucção matricial está associada a fenômenos de alteração de forças de capilaridade, frequentemente associadas a alterações de condições atmosféricas. Pesquisas realizadas por Fredlund and Raharjo (1993) sobre a sucção total, matricial e osmótica, mostram que para grande parte dos problemas que envolvem os solos não saturados estão relacionados com variações do clima, e conseqüentemente com as variações da sucção matricial, tendo a sucção osmótica pouca relevância, podendo-se então substituir a componente da sucção matricial pela sucção total, especialmente quando se trata de solos com teores em água elevados (> 20%).

Pelo que foi exposto anteriormente, na continuação deste trabalho, sempre se referirá a sucção ( $s$ ) como a sucção matricial. Eq.2.1

$$S = u_a - u_w \quad \text{Eq.2.1}$$

Fredlund and Rahardjo (1993) descrevem algumas das técnicas de medição de sucção mais utilizadas. Algumas das técnicas de medição, tal como tensiómetros (Delage et al., 2008), psicómetros (Delage et al., 2008), placas de pressão (Richards, 1941), e o método do papel de filtro (Chandler et al., 1992; Marinho e Oliveira, 2006) abrangem uma vasta gama de medições da sucção.

Neste trabalho apenas será descrito o método do papel de filtro, pois foi o método utilizado no âmbito do presente trabalho. A seleção deste método deveu-se ao facto de permitir medir uma ampla gama de valores de sucção (desde 10 kPa a 10 MPa), ser um método simples, de baixo custo e eficiente (Bicalho, et al., 2008).

O ensaio do papel de filtro consiste num método indireto de medição da sucção, que é baseado na suposição de que é atingido o equilíbrio entre o papel de filtro e o solo, através de trocas de água (liquida ou vapor) entre o papel de filtro e a amostra de solo. Quando atingidas as condições de equilíbrio estabelecidas procede-se à medição do teor em água retido pelo papel de filtro (Fredlund and Rahardjo, 1993). Se o método for realizado com o papel de filtro em contacto direto com a amostra de solo, então o equilíbrio será atingido entre o teor em água liquida e o solo. O valor do teor em água medido no papel de filtro irá corresponder à sucção matricial. Por outro lado se o ensaio se realizar sem o contato direto entre o papel de filtro e a amostra de solo, o equilíbrio será atingido entre a amostra de solo e o vapor de água. O valor do teor em água medido no papel de filtro irá corresponder à sucção total. Estes dois métodos são ilustrados na Figura 2.

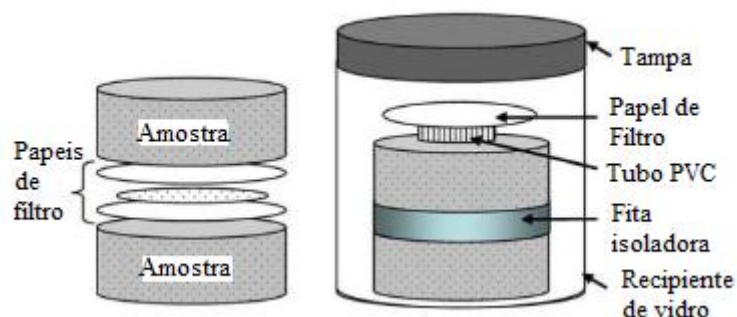


Figura 2 - Métodos do papel de filtro para a medição da sucção matricial e total (Yang et al.,2008)

O valor do teor em água medido é então convertido no valor da sucção, usando a curva de calibração para o tipo de papel de filtro usado. No presente trabalho utilizou-se o papel de filtro Whatman nº42. A precisão do método de papel de filtro depende da curva de calibração em que foi determinada. Na Tabela 2 são apresentadas várias curvas de calibração para o papel de filtro Whatman nº42 que tem sido propostas, (Bicalho et al.,2008).

Sucção	$\omega$ [%]	$\text{Log}_{10}$ (Sucção) [kPa]	Referência
Matricial e Total	$\omega < 45,3$ $\omega > 45,3$	$5,327 - 0,0779 \omega$ $2,412 - 0,0135 \omega$	ASTM D5298
Matricial		$6,281 - 0,0822 \omega$	Hamblin (1981)
Matricial		$5,777 - 0,060 \omega$	Fawcett and Collis-George (1967)
Matricial	(*)	$5,85 - 0,0622 \omega$	Chandler and Gutierrez (1986)
Matricial	$\omega < 47$ $\omega > 47$	$4,842 - 0,0622 \omega$ $6,050 - 2,48 \text{Log } \omega$	Chandler et al. (1992)
Matricial e Total	$\omega < 33$ $\omega > 33$	$4,83 - 0,0839 \omega$ $2,57 - 0,0154 \omega$	Oliveira e Marinho (2006)
Nota : $\omega$ = Teor de água retido pelo papel de filtro (*) Série de sucção (80 - 6000 kPa)			

Figura 2.1 - Curvas de calibração para o papel de filtro Whatman 42 (Adaptado de Bicalho et al., 2008)

Segundo (Bicalho, et al, 2011), num estudo sobre a evolução das calibrações para as curvas de retenção de água dos solos, concluiu-se que as calibrações propostas por Chandler (1992), e ASTM D5298, são as calibrações que para o papel de filtro em estudo apresentam melhores resultados. Assim, e para efeitos de comparação com os resultados obtidos em (Martins, 2011), utilizou-se a proposta de calibração para o papel de filtro Whatman nº 42 apresentada por (Chandler, 1992)

## **2.2 Influência da compactação em solos não saturados**

A compactação consiste num processo mecânico, em que a aplicação de cargas repetidas sobre o solo leva a uma diminuição do seu volume e como consequência diminuição do seu valor de índice de vazios e aumento do seu peso específico. Esta diminuição do volume resulta da expulsão do ar dos vazios, não alterando significativamente os teores de água, nem o volume das partículas sólidas durante a compactação. Por outro lado o processo da compactação provoca um aumento do grau de saturação devido a diminuição do volume de vazios. Contudo não é possível expulsar todo o ar dos vazios, ficando sempre alguma quantidade de ar preso entre as partículas sólidas do material. Com isto, e com a definição de solo não saturado descrita anteriormente pode-se concluir que um solo compactado é um solo não saturado. A compactação leva a uma alteração do comportamento mecânico de um solo aumentando a sua resistência e diminuindo a sua deformabilidade.

O estudo dos solos após a compactação é de grande importância, pois muitos dos projetos de engenharia civil tem por base solos compactados (por exemplo, bases de edifícios, projetos de vias de comunicação e barragens). Projetos de vias de comunicação, são construídos sobre camadas de solos compactados, normalmente em condições de não saturação dos solos durante o processo de construção e em muitos casos permanecem nestas condições durante todo o tempo útil de vida da estrutura em serviço. Várias medidas de manutenção das estruturas são realizadas no sentido de manter as condições para que estas promovam propriedades dos materiais que sejam favoráveis ao bom funcionamento da estrutura, nomeadamente a resistência ao corte e a deformabilidade.

A previsão do comportamento mecânico em termos de deformabilidade de solos compactados pode ser um processo muito complexo, visto que depende de vários fatores, como o tipo de solo e seu comportamento quando esta em contacto com a água, tipo de compactação utilizada, esta realizada de acordo com o tipo de projeto a realizar, o estado de tensão a que o aterro se encontra submetido, entre outros (Reis, 2010).

### **2.2.1 Curvas de retenção de água no solo**

Como já foi referido nas secções anteriores, o comportamento dos solos não saturados, depende do valor da sucção, que é influenciada pelo teor de água de um dado tipo de solo. A relação entre o teor em água e a sucção pode ser representada empiricamente pelas curvas de retenção de água no solo. As curvas de retenção de água dos solos são definidas como a capacidade que o solo tem para armazenar água para um dado valor de sucção. A Figura 2.2.1 mostra a relação entre a sucção do solo e o teor em água,  $w$ , ou grau de saturação,  $S$ , (Venapalli, S, K., 1999). As curvas de retenção variam para diferentes tipos de solo e para diferentes condições de estado. As curvas de retenção de solos não saturados têm sido estudadas tanto na física dos solos (Van Genuchten, 1980), como na mecânica dos solos (Sivakumar, 2000; Tarantino and Tombolato, 2005, entre outros).

A Figura 2.2.1, consiste na representação de duas curvas de retenção de água do solo; Uma curva realizada com o teor em água na secagem, e uma curva realizada com o teor em água na molhagem.

As curvas de retenção dos solos mostram a influência do teor de água em cada tipo de solo para índices de vazios semelhantes, como pode ser observado na Figura 2.2.1. Com a diminuição do teor em água verifica-se o aumento do valor da sucção. Observa-se que para um solo saturado (teor em água 100%) o valor da sucção é considerado nulo, motivo pelo qual na mecânica dos solos saturados não se tem em conta o valor da sucção na avaliação do comportamento mecânico dos solos.

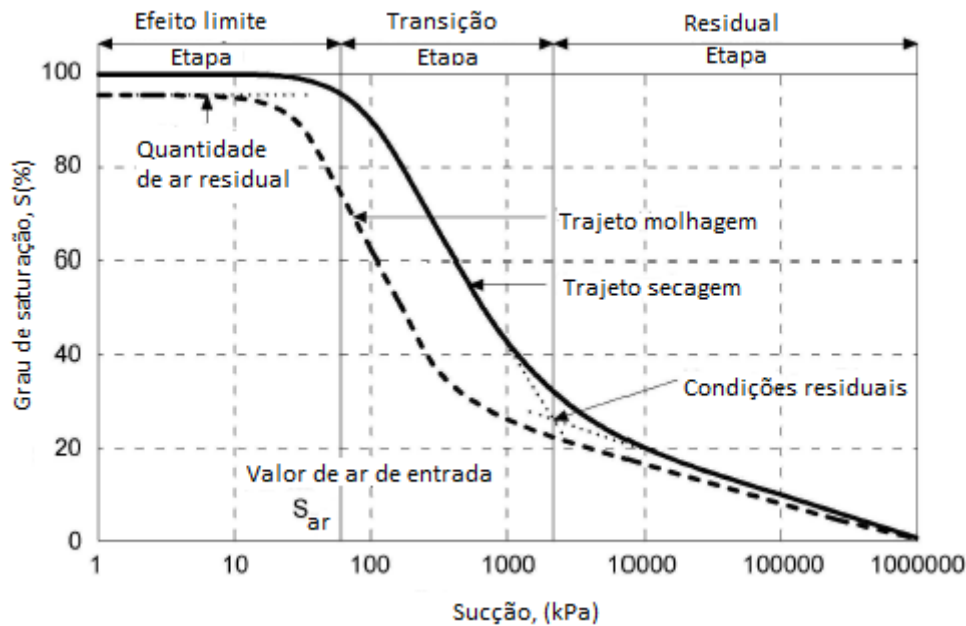


Figura 2.2.1- Curva de retenção típica (Vanapalli et al., 1996)

A mesma amostra de solo, apesar de apresentar a mesma textura e mesma mineralogia, pode conduzir a diferentes curvas de retenção do solo, se estas forem preparadas para diferentes teores em água inicial, o que significa que o comportamento hidromecânico das amostras varia.

Vanapalli (1999), estudou a influência do teor em água em vários tipos de solos, apresentando curvas de retenção típicas para cada um dos solos como é mostrado pela Figura 2.2.2. Segundo Vanapalli (1999), a capacidade de armazenamento de água num solo é maior para solos que contenham uma maior percentagem de finos e o ritmo de aumento da sucção com a diminuição do grau de saturação diminui para solos com maior percentagem de finos, ou seja o índice de secagem do solo diminui com o aumento dos finos.

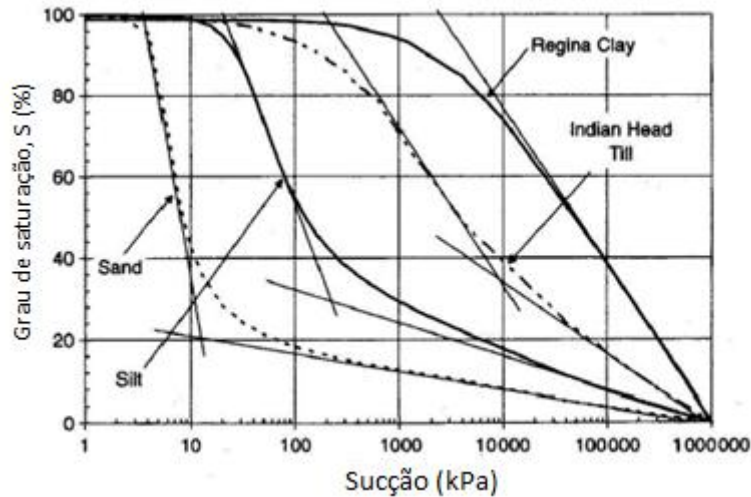


Figura 2.2.2 – Curvas de retenção de água no solo típicas para 4 solos canadenses (Vanapalli et al., 1999).

Vanapalli (1999), estudou a influência do teor em água inicial no comportamento hidromecânico de uma argila arenosa, através de várias amostras compactadas estaticamente com placas de 100 mm de diâmetro e 21 mm de altura. Para isto realizou uma série de testes através de três conjuntos de amostras, sendo para cada uma utilizado o mesmo índice de vazios inicial e para cada um dos conjuntos foram aplicados teores em água que variaram entre 12.5 e 19.2%, incluindo valores de teor em água para o lado seco da curva de compactação, para o teor em água ótimo e para o lado húmido da curva de compactação. Os resultados obtidos para cada amostra permitiu a comparação da relação entre a sucção matricial e o grau de saturação para cada amostra com diferentes teores em água iniciais, como é ilustrado pela Figura 2.2.3

Da Figura 2.2.3 conclui-se que para a compactação realizada com valores de teor em água inferiores ao ótimo, os valores de sucção são superiores do que quando compactado para valores de teor em água superiores aos ótimo, o que mostra uma influência do teor em água no comportamento do material.

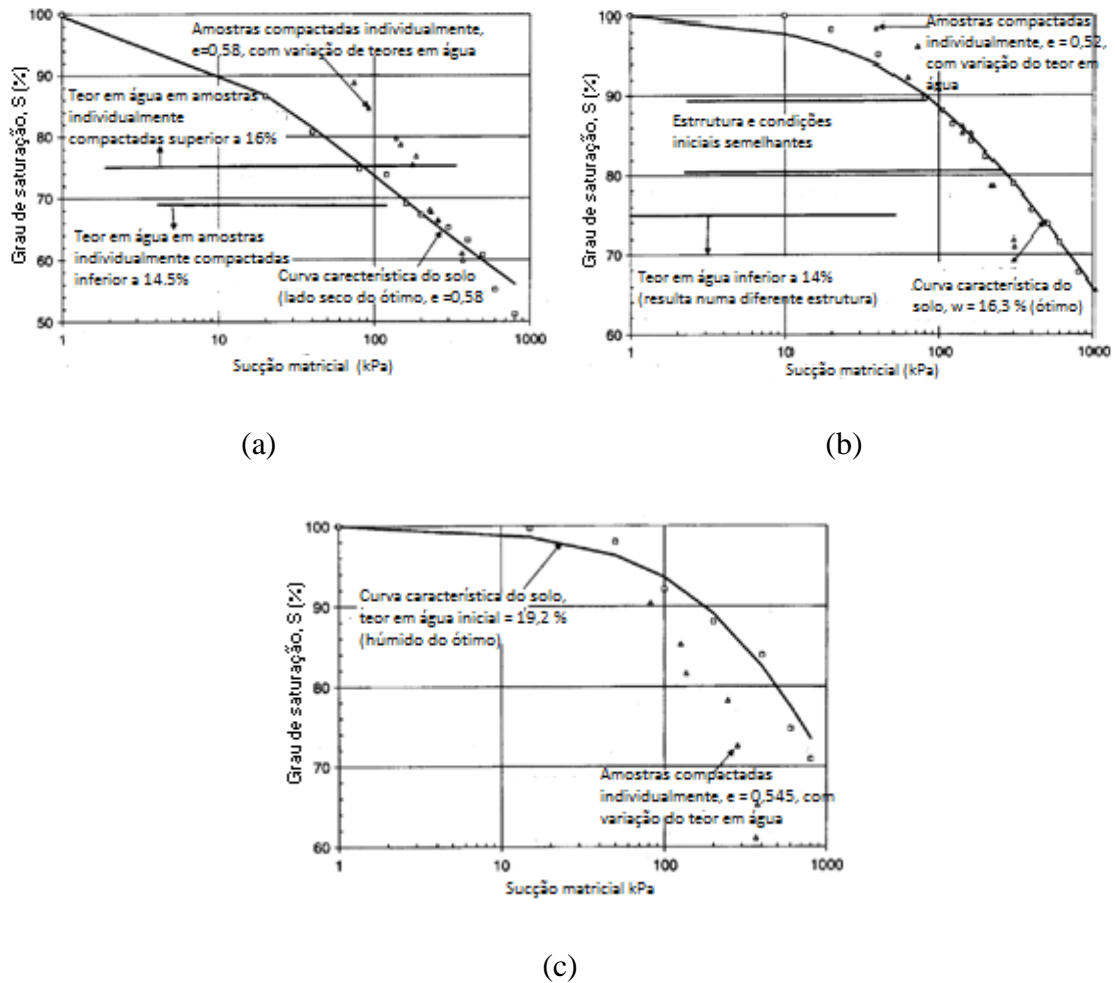


Figura 2.2.3 – Comparação das curvas de retenção para as amostras compactadas para o mesmo índice de vazios  $e$ : (a) compactada para o teor em água do lado seco do ótimo; (b) compactação para o teor em água ótimo; (c) compactação para o teor em água do lado húmido da curva de compactação (Vanapalli, et al., 1999)

A Figura 2.2.3 mostra que influência do índice de vazios no comportamento hidromecânico dos solos não saturados é dada pelas variações na curva de retenção de água devido a variações do índice de vazios. Diferentes valores de índices de vazios podem ser obtidos através da variação das energias de compactação.

Segundo Barrera (2002), para um dado grau de saturação a diminuição do índice de vazios do solo, leva a um aumento da sucção. As diferenças entre o índice de vazios e a sucção tendem a diminuir com o aumento da humidade no solo, ou seja para o lado molhado da curva de compactação.

A Figura 2.2.4 mostra que para um determinado grau de saturação, a diminuição do índice de vazios representa um aumento do valor de sucção.

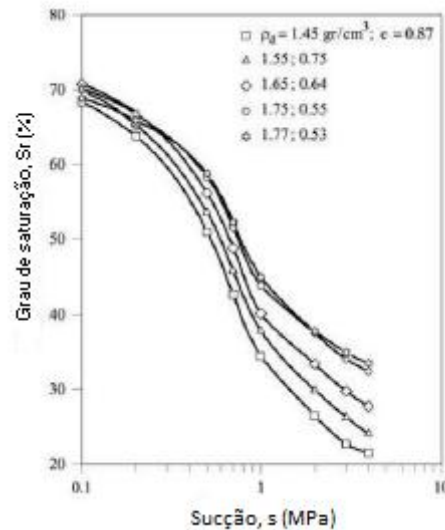


Figura 2.2.4 – Curvas de retenção de água para diferentes densidades constantes de uma argila siltosa de baixa plasticidade de Barcelona (Barrera, 2002).

Barrera (2002) e Sun et al. (2007), concluíram através de estudos realizados, que uma amostra é mais densa quanto maior for o seu grau de saturação para um mesmo valor de sucção, o que permite concluir que para densidades do solo do lado húmido da curva de compactação a densidade não tem influência relevante na sucção, no entanto as curvas de secagem mostram uma clara dependência da densidade inicial nos valores de sucção.

## Capítulo 3 - Caracterização mecânica das camadas de aterro

Os aterros na construção de infraestruturas de transportes, devem conter uma rigidez total que limite os assentamentos máximos e que minimize os assentamentos relativos da plataforma do aterro em serviço, com o fim de minimizar os custos de exploração, reduzir o nível de vibrações induzidas em infraestruturas próximas, e permitir um maior conforto dos passageiros no caso de uma obra rodoviária ou ferroviária.

Estes aspetos incorporam exigências rigorosas em construções de elevada qualidade, como por exemplo de aterros ferroviários de alta velocidade, nomeadamente em relação ao estado de qualidade dos materiais a utilizar e limites das propriedades mecânicas dos materiais (módulo de deformabilidade) com o objetivo de ser conseguida a homogeneidade no comportamento mecânico de todas as camadas de aterro.

Neste trabalho será dada especial importância às exigências de controlo da compactação, ou seja compactação relativa a propriedades mecânicas de camadas compactadas, como o módulo de deformabilidade. Nas secções seguintes será feita uma descrição dos vários ensaios de campo que foram realizados, em que os resultados foram utilizados no presente trabalho para avaliação do comportamento mecânico do aterro experimental em estudo.

### **3.1 Ensaio de carga estático com placa (ECP)**

O ECP permite a determinação do módulo de deformabilidade a partir da relação entre as cargas exercidas e os respetivos assentamentos. O ensaio consiste no carregamento de uma placa circular, colocada sobre a camada de aterro e medição das deformações sofridas com o aumento da carga aplicada. As cargas são aplicadas na placa através de

macacos hidráulicos que, por sua vez exerce uma força de reação contra um equipamento pesado (por exemplo, um caminhão). Este tipo de ensaio é geralmente realizado com base na norma francesa AFNOR NF P94-117-1 (2000) e na norma alemã DIN 18134 (2001).

Com base da norma francesa AFNOR NF P94-117-1 (2000) o valor máximo do módulo de deformabilidade que pode ser medido neste ensaio é 250 MPa (Martins, 2011). O ensaio consiste na aplicação, após uma pré-carga, de dois ciclos de carregamentos sucessivos através de uma placa de diâmetro de 600 mm, onde o primeiro ciclo deve corresponder a uma tensão média sob a placa de 0,25 MPa, devendo-se manter esta tensão durante o tempo necessário à estabilização do deslocamento da placa. O segundo ciclo de carregamento deverá atingir uma força tal que a tensão média sob a placa seja de 0,20 MPa e, à semelhança do primeiro ciclo, a descarga só poderá ser realizada após a estabilização da deflexão da placa como mostra o gráfico da Figura 3.1a). O módulo de deformabilidade ( $EV_2$ ) é calculado a partir da fórmula da Boussinesq apresentada na Equação 3.1.

$$E_{v2} = \frac{\pi}{4} (1 - \nu^2) \frac{\sigma \cdot r}{Z_2} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde, o  $\nu$  é o coeficiente de Poisson,  $\sigma$  a tensão normal na placa,  $r$  o raio da placa e o  $Z_2$  é valor do assentamento medido durante o segundo ciclo de carga.

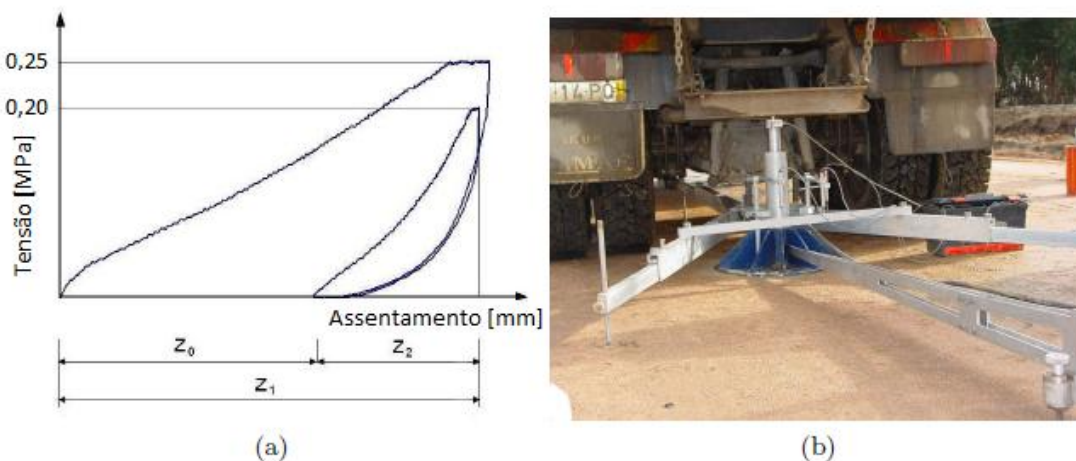


Figura 3.1 - ECP seguindo a norma AFNOR NF P94-117-1 (2000); a) Diagrama esquemático dos ciclos de carregamento e descarregamento aplicados sobre a placa durante o ensaio; b) Apresentação do método de ensaio, (Martins, 2011).

Realizando o ensaio de carga em placa de acordo com a norma alemã DIN 18134, este consiste em aplicar, após a pré-carga, dois ciclos de carregamento sucessivos. No primeiro ciclo de carregamento a força deverá ser aplicada no mínimo em seis patamares, com incrementos de força semelhantes até se atingir a carga máxima. A descarga deverá ser realizada por patamares nos quais sejam atingidos 50% e 25 % da carga máxima. O segundo ciclo deverá ser realizado até a carga atingir o valor do penúltimo patamar realizado no primeiro ciclo. Segundo a norma poderão ser utilizadas placas de 300, 600 e 762 mm de diâmetro. Para o cálculo do módulo de deformabilidade  $E_v$ , a carga deverá ser aumentada até se atingir assentamentos de 5, 8 ou 13 mm ou ser atingida uma tensão normal sob a placa de 0,50, 0,25 ou 0,20 MPa, respetivamente. No caso de ser atingido os 5 mm de assentamento em primeiro lugar, a tensão máxima medida nessa fase será considerada como a tensão máxima. A expressão apresentada na norma para o cálculo do módulo de deformabilidade é apresentada de seguida na Equação 3.2.

$$E_{v2} = \frac{1,5.r}{a_1 + a_2.\sigma_{max}} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde  $r$  é o raio da placa,  $\sigma_{max}$  é a tensão sob a placa atingida no primeiro ciclo de carregamento e  $a_1$  e  $a_2$  são os coeficientes, determinados a partir do ajuste de um polinómio de segundo grau aos pontos correspondentes ao segundo ciclo de carregamento como é mostrado na Figura 3.2a. Na Figura 3.2b é apresentado um exemplo de realização do ensaio.

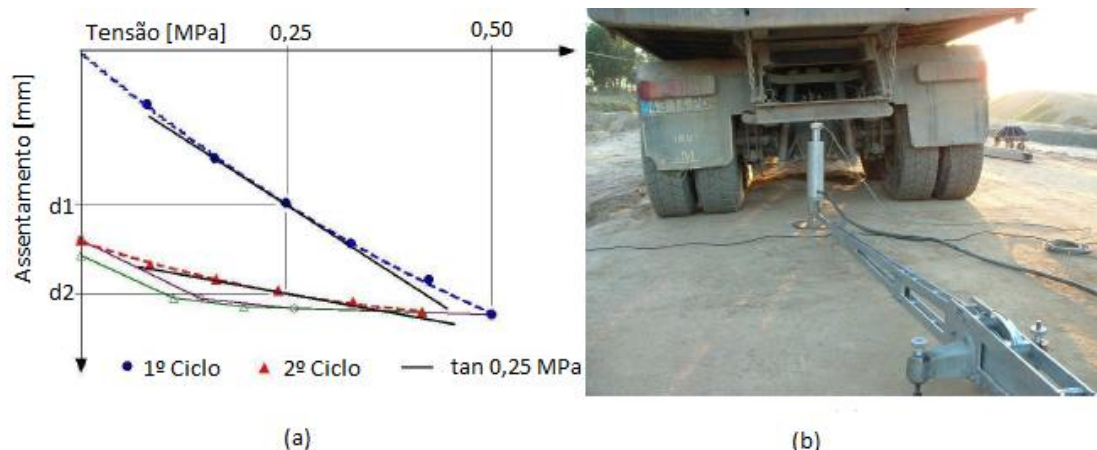


Figura 3.2- ECP de acordo com a norma DIN 18134 (2001); a) Curva tensão – assentamento para determinação do módulo de deformabilidade,  $E_{v2}$ ; b) Exemplificação do ensaio ECP; (Martins, 2011).

### 3.2 Defletómetro de impacto ligeiro (DIP)

O defletómetro de impacto ligeiro (DIP) é um equipamento portátil utilizado para determinação do módulo de deformabilidade dinâmico. O princípio deste equipamento consiste na queda de uma massa móvel, de uma altura definida, sobre uma placa rígida, cujo impulso aplicado pela massa é medido através de uma célula de carga e o deslocamento é medido por pelo menos um geofone colocado no centro da placa. O módulo de deformabilidade dinâmico,  $E_{DIP}$ , é assim calculado através da carga aplicada e o respetivo deslocamento da placa como mostra a Equação 3.3.

$$E_{DIP} = \frac{K \cdot (1 - \nu^2) \cdot \sigma \cdot R}{\delta_c} \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde,  $K$  é igual a  $\pi/2$  ou 2, para placas rígidas ou flexíveis respetivamente,  $\sigma$  é a tensão aplicada,  $R$  é o raio da placa,  $\delta_c$  deslocamento no centro da placa e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson.

Os resultados que serão objeto de análise no presente trabalho foram obtidos com o equipamento Prima 100 LFWD fabricado pela Carl Bro Pavement consultants, o equipamento pesa aproximadamente 26 Kg, em que a massa móvel que cai sobre a placa de apoio através de quatro amortecedores de borracha pesa 10 kg. O impulso provocado pela massa móvel na placa será entre 1 e 15 kN em cerca de 15-20 ms. Este equipamento permite o uso de três placas de 100, 200, 300 mm de diâmetro. Os resultados apresentados no âmbito deste trabalho foram obtidos com uma placa de 300 mm. A Figura 3.3 mostra o equipamento descrito e o esquema com identificação dos componentes do equipamento anteriormente descrito.

O PRIMA 100 LFWD vem preparado com um dispositivo de ligação, para ser ligado a um computador que esteja equipado com um programa de gravação, interpretação de dados e visualização. Este programa permite obter os valores de tempo e de pico das cargas aplicadas respetivamente,  $F(t)$ , e a deflexão obtida,  $\delta(t)$ , e permite estimar o valor do módulo de deformabilidade,  $E_{DIP}$ .

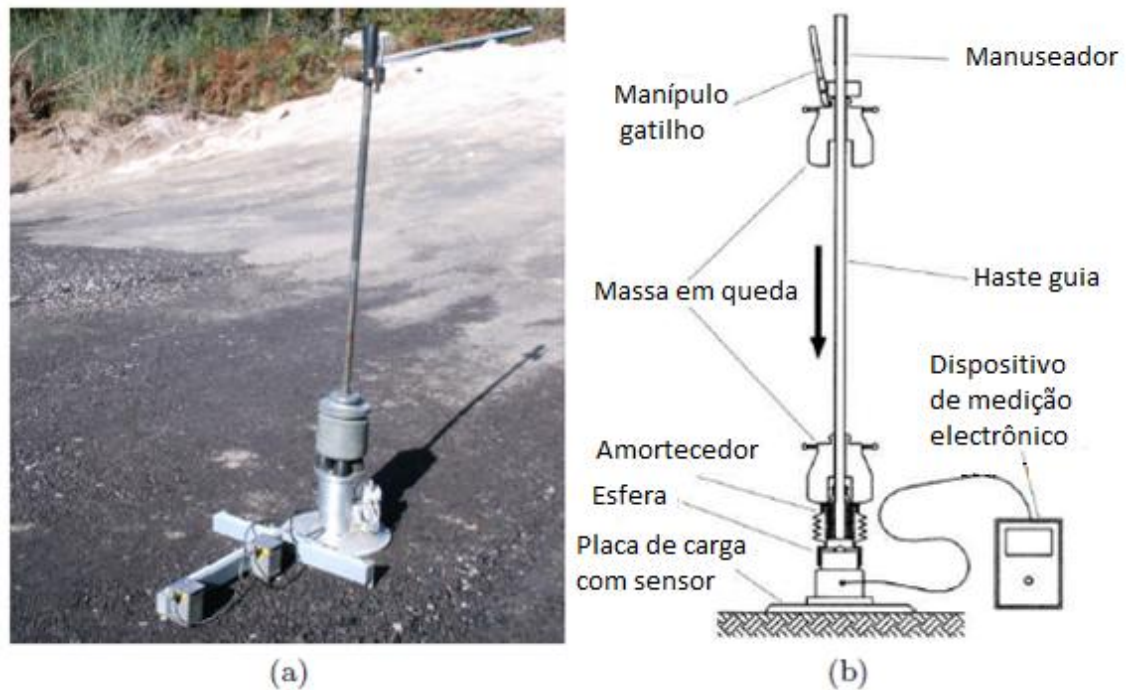


Figura 3.3 - (a) DIP (Martins, 2011); (b) Componentes do DIP (Adam and Adam, 2003)

Vários estudos foram realizados com o objetivo de avaliar os resultados obtidos pelo DIP. Para tal foram utilizados como referência os valores de módulo de deformabilidade obtidos pelo ensaio de carga em placa (ECP), por ser um ensaio utilizado a muitos anos e com grande utilidade na avaliação da resistência e rigidez do pavimento. O ECP será utilizado como referência na avaliação dos resultados do DIP, proceder-se a comparação dos resultados obtidos, com os resultados encontrado na bibliografia de diferentes autores.

Alshibli et al, (2005), realizou testes de diferentes tipos de solos com o DIP e com o ECP em laboratório para avaliar a relação entre os ensaios. Os valores obtidos no ECP variaram aproximadamente entre 0 e 700 MPa. A relação encontrada pelo autor apresentada na Equação 3.4 é obtida entre o módulo de deformabilidade obtido com o DIP,  $E_{LFWD}$ , e o módulo de deformabilidade relativo ao segundo ciclo de carregamento do ECP,  $E_{ECP}$ .

$$E_{ECP(R)} = 25,25e^{0,006E_{LFWD}} \quad (R^2 = 0,90) \quad \text{Equação 3.4}$$

Seyman, (2003), testou para vários tipos de solo recorrendo aos ensaios DIP e ECP, onde obteve a correlação apresentada na Equação 3.5 para a relação dos resultados obtidos através dos dois tipos de ensaios.

$$E_{ECP(R)} = 28,25e^{0,006E_{LFD}} \quad (R^2 = 0,897) \quad \text{Equação 3.5}$$

Fortunato (2005), realizou 36 ensaios com o DIP (300 mm de diâmetro) e com o Ensaio de carga em placa (600 mm de diâmetro) no decorrer de um projeto de investigação relativo a estudos de capacidade de carga para a renovação de plataformas ferroviárias, projeto que foi realizado nas camadas que constituem a subestrutura antiga das vias férreas da Linha do Norte, em Portugal. A partir dos dados obtidos por cada um dos ensaios encontrou-se a melhor relação possível entre estes mesmos dados, e consequentemente a melhor relação entre o módulo de deformabilidade obtido segundo o ensaio do DIP e o módulo de deformabilidade obtido segundo o ensaio de ECP. Nesta campanha de 36 ensaios os valores de módulo de deformabilidade atingidos pelo ECP foram de cerca de 148 MPa. Estas relações são apresentadas de seguida nas Equações 3.5 e 3.6.

$$E_{LFD} = 1,13 \cdot E_{V2}^{0,98} \quad (R^2 = 0,74) \quad \text{Equação 3.5}$$

$$E_{LFD} = 1,02 \cdot E_{V2} \quad (R^2 = 0,68) \quad \text{Equação 3.6}$$

### 3.3 “Geogauge” – Soil stiffness gauge (SSG)

O geogauge é um equipamento portátil capaz de realizar medições de forma simples do módulo de deformabilidade dos solos “in-situ”. É um equipamento fabricado pela Humbolt Manufacturing Company (Norridge, III), pesa aproximadamente 10 kg, contém 0,254 m de altura e 0,28 m de largura. Este equipamento é geralmente utilizado para a avaliação de camadas compactadas de aterros. O aparelho é colocado sobre a superfície da camada a ensaiar por meio de um anel rígido, em que o diâmetro exterior é de 0,114 m e o interior é de 0,089. Na Figura 3.4b é demonstrado o anel rígido em pormenor.

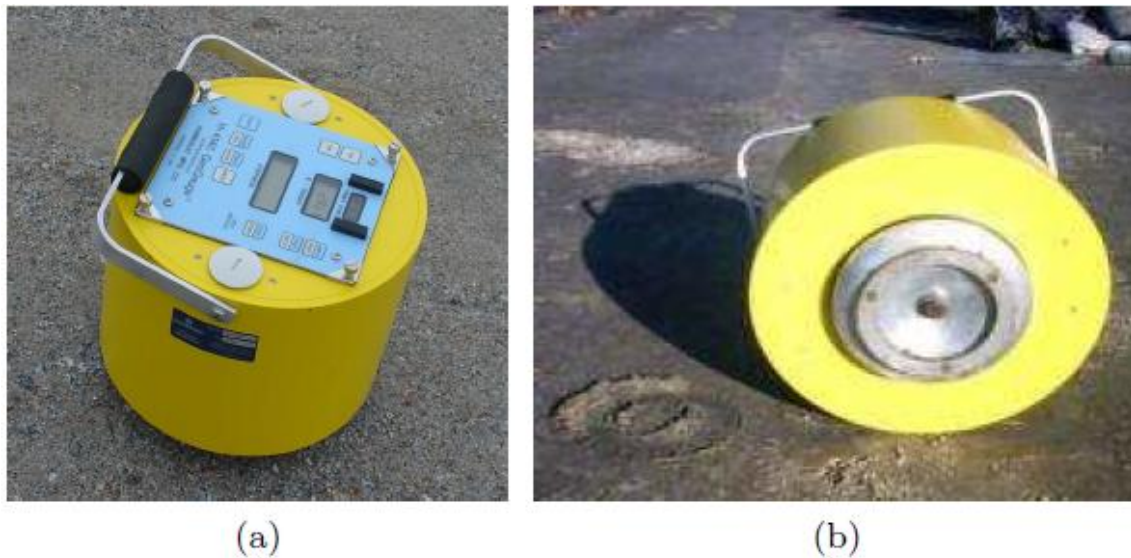


Figura 3.4- Humbolt Stiffness Gauge: (a) Aspetto geral; (b) detalhe do anel rígido (Martins, 2011)

O aparelho é constituído por um vibrador eletromecânico, que produz vibrações num intervalo de frequências de 100 a 196 Hz em incrementos de 4 Hz, produzindo 25 frequências diferentes obtendo forças de aproximadamente de 9 N. A força e a deflexão são registados por sensores incorporados no equipamento. Os deslocamentos verticais induzidos entre o solo e o anel rígido são normalmente inferiores a  $1,27 \times 10^{-6}$  m. Um microprocessador calcula a rigidez, K, da camada para cada uma das 25 frequências, onde o valor medio das 25 medições é apresentado bem como o valor do desvio padrão (Alshibli et al.,2005). O valor da rigidez, k obtido é facilmente transformado no valor do módulo de deformabilidade através da Equação 3.7.

$$E_{SSG} = \frac{K \cdot (1 - \nu^2)}{1,77 \cdot R} \quad \text{Equação 3.7}$$

Onde,  $E_{SSG}$  é o módulo de deformabilidade do solo, K é a rigidez fornecida pelo “geogauge”,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson e R é o raio do anel rígido.



Figura 3.5 – Esquema de funcionamento do Geogauge (Fortunato, 2005)

O equipamento apresenta valores de módulos de deformabilidade para uma profundidade duas vezes superior ao diâmetro do anel rígido exterior (cerca de 0,23 m).

### 3.4 Método de teste contínuo (Portancemètre)

O medidor de capacidade de suporte contínuo (MCSC), cuja designação original é “Portancemètre”, contém a vantagem de abranger uma maior área de superfície no ensaio em contraste com os ensaios anteriormente descritos que apenas permitem testes pontuais. O “Portancemètre” é um aparelho de alto rendimento que mede continuamente módulos de deformabilidade de plataformas de aterros que foi desenvolvido pelo “Center d’Études Techniques de l’Équipement” (CETE). Este equipamento tem um domínio de aplicação para camadas de solo compactadas com valores de módulos de deformabilidade a variar entre 30 a 300 MPa medidos à superfície em ensaios de carga em placa. Os valores obtidos neste tipo de ensaio são referidos para uma profundidade na ordem dos 0,60 m. O aparelho consiste numa roda vibrante com 1 m de diâmetro, 0,20 m de espessura e massa de 600 kg, que se desloca a velocidade de 1 m/s, aplicando uma força ao solo com uma frequência de 35 Hz. Este equipamento é fixado a um atrelado e rebocado por um veículo todo o terreno (4x4) facilitando a deslocação do equipamento como pode ser observado na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Equipamento Portancemètre; a) aspecto geral; b) Pormenor da roda vibrante; (Martins, 2011)

O princípio de medição é baseado na determinação da curva da força de vibração aplicada pela roda em função da deflexão do solo, conseguindo-se assim a determinação da rigidez do solo e seu módulo de deformabilidade. A instrumentação instalada sobre o equipamento, permite obter o valor da componente vertical da aceleração das massas vibrantes e suspensas, a frequência de vibração e o ângulo de fase entre a amplitude vertical de vibração e a força centrífuga aplicada à roda. A Figura 3.6 mostra o princípio de medição descrito.



Figura 3.6 - Esquema de Princípio de funcionamento do "Portancemètre" (Fortunato, 2005)

Um algoritmo de cálculo associado determina o esforço vertical aplicado ao solo (FTA) e a respetiva deflexão, onde o esforço vertical aplicado ao solo é determinado pela Equação 3.8.

$$FTA = M_1 \cdot g + M_0 \cdot \Gamma_b + (M_1 - M_0) \cdot \Gamma_c + m_e \cdot \omega^2 \cdot \cos\varphi \quad \text{Equação 3.8}$$

Em que,  $M_1 \cdot g$  é o peso total do conjunto,  $M_0 \cdot \Gamma_b$  é a força de inércia da massa vibrante, sendo  $\Gamma_b$  a aceleração vertical da massa  $M_0$ ,  $(M_1 - M_0) \cdot \Gamma_c$  é a força de inércia dos chassis, sendo  $\Gamma_c$  a aceleração vertical das massas suspensas e  $m_e \cdot \omega^2 \cdot \cos\varphi$  é a componente vertical da força centrífuga produzida pela roda.

O movimento vertical da roda de vibração é determinado por uma integração dupla do sinal da aceleração vertical. A média das medições de cada 30 ciclos sucessivos, permite obter a curva força-deflexão. O módulo de deformabilidade é calculado aproximadamente de 1 em 1 metro do percurso, recorrendo a regressão linear sobre os valores que se situam entre 30% e 90% da força vertical máxima aplicada (FTA) para a determinação da rigidez.

A velocidade e a distância de todo o percurso são medidas por meio de um radar de efeito Doppler, que irá permitir situar o percurso medido no perfil longitudinal. Contudo algumas condições têm que ser satisfeitas para que se obtenha valores satisfatórios de medições com o portancemètre, tais como relativamente a geometria da camada em que as inclinações do perfil longitudinal terão que ser inferiores a 7%, e as inclinações dos perfis transversais terão que ser inferiores a 5%. Relativamente às propriedades mecânicas, materiais soltos com baixa resistência ao corte na superfície não devem ser objeto de ensaio com este tipo de equipamento.

Foram realizados vários testes durante as fases de desenvolvimento deste equipamento que mostraram uma boa correlação com os métodos tradicionais como os ensaios de carga em placa (600 mm) e os ensaios dinâmicos (Quibel, 1999). Um grupo de ensaios realizados com o Portancemètre em estruturas construídas com materiais diferentes (solos naturais, solos tratados) cujos valores do módulo de deformabilidade medidos à superfície em ensaios de carga estática em placa de 600 mm de diâmetro, variam entre 20 e 500 MPa, demonstraram uma boa correlação entre os valores determinados por ambos os ensaios, o que permitiu relacionar a rigidez,  $k$ , obtida no ensaio do Portancemètre com o módulo de deformabilidade equivalente obtido com o ensaio de

carga em placa de 600 mm realizado de acordo com a norma francesa AFNOR NF P94-117-1 através da Equação 3.9 (Quibel, 1999).

$$E = 5 \times k \quad \text{Equação 3.9}$$

Onde o módulo de deformabilidade,  $E$  é expresso em MPa, e a rigidez,  $k$ , é expresso em kN/mm.

Na cabine do veículo rebocador é instalado um computador onde pode-se introduzir dados de identificação num programa que mostrará graficamente a evolução do ensaio em tempo real, podendo o operador seguir a evolução dos valores medidos do módulo de deformabilidade avaliando assim os níveis de qualidade e possível ocorrência de áreas insatisfatórias. Os gráficos exibidos expressam os módulos de deformabilidade medidos ao longo do comprimento da camada de aterro e ainda as frequências de vibração aplicadas. Na Figura 3.7 é mostrada uma visualização do programa e os respectivos gráficos descritos.

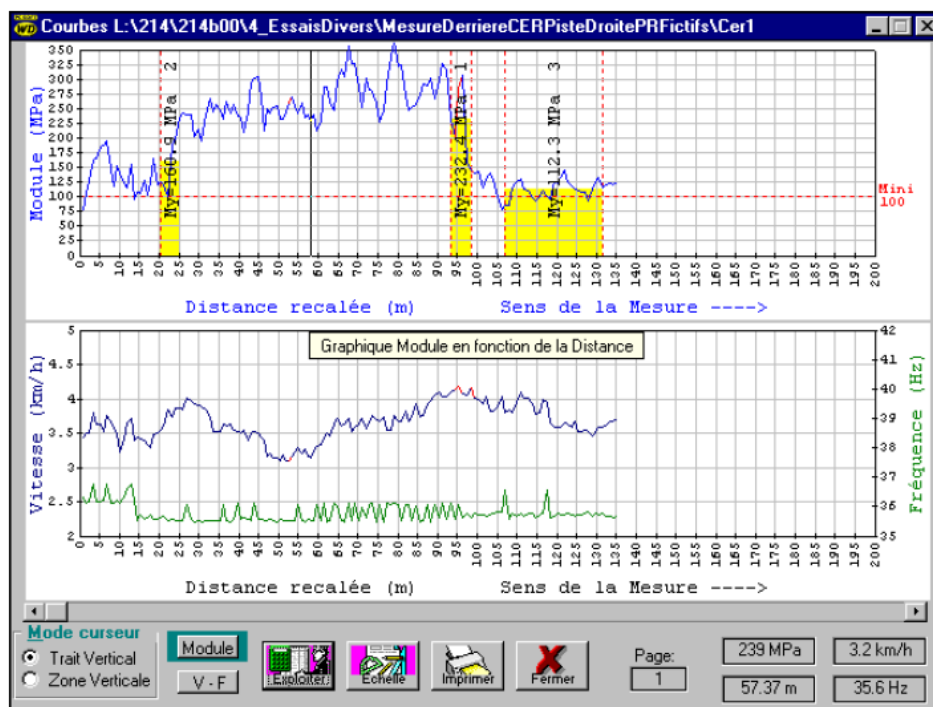


Figura 3.7- Aspecto dos gráficos apresentados no monitor do Portancètre, (Fortunato, 2005).



# Capítulo 4 - Descrição da metodologia de análise dos resultados

## 4.1 Enquadramento do aterro em estudo

Como já referido no Capítulo 1, a parte prática deste trabalho incidiu sobre a análise de resultados obtidos num aterro experimental (Martins, 2011) construído no âmbito do projeto de investigação nacional POCI/ECM /61114/004, intitulado de “Interação solo-via-férrea para comboios de alta velocidade”, financiado pela Fundação para Ciência e Tecnologia (FCT).

O aterro foi construído com a cooperação entre a Rede Ferroviária Nacional – REFER, a empresa MOTAENGIL, e a GEOCONTROL. Foi construído perto da nova linha férrea entre “Sines” e “Caia”, próximo da “Casa Branca – Évora”, mais precisamente ao quilómetro K 106+800, cerca de 2,5 km da estação ferroviária de “Monte das Flores”. Os ensaios in-situ sobre o referido aterro foram realizados no período de dois meses, entre Outubro e Novembro do ano 2006.

### 4.1.1 - Geometria

As camadas de aterro são retangulares, com dimensões em planta de 50 metros de comprimento e 6 metros de largura. Para a correta localização dos ensaios realizados criou-se uma malha que consistiu em dividir a largura em 3 corredores de 2 metros denominadas por A, B e C, e por 10 colunas de 5 metros, com a dominação numérica de 1 a 10 formando assim 30 quadrículas de  $5 \times 2 \text{ m}^2$  de área. A Figura 4.1 representa um esquema do aterro descrito. Refira-se ainda que nos corredores A e B foram realizados

todos os tipos de ensaios, enquanto no corredor B apenas foram realizados ensaios não destrutivos.

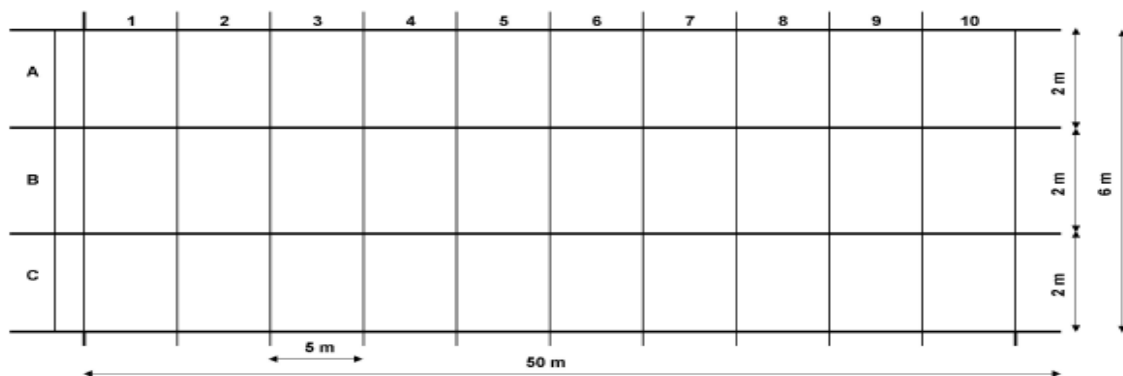


Figura 4.1 – Representação do aterro experimental descrito com dimensões de 50x6 m<sup>2</sup> (Martins, 2011)

Segundo Martins (2011) nem todas as camadas foram construídas de acordo com o inicialmente planeado, tendo algumas sido construídas com metade do comprimento (25 metros), e/ou construídas sobre outras camadas ao invés de ser construídas sobre a camada de fundação.

Foram construídas três camadas com a areia argilosa (*SC*), com espessuras de 0,30, 0,40 e 0,50 metros, e duas camadas com agregado esmagado (*CA31,5*) com espessuras de 0,22 e 0,30 metros. Contudo, apenas os resultados obtidos nas camadas de areia argilosa serão objeto de análise no presente trabalho.

#### 4.1.2 - Materiais

De acordo com Martins (2011) foram utilizados dois tipos de materiais na construção do aterro, areia argilosa (*SC*) e agregado esmagado (*CA31,5*). Na Figura 4.2 são apresentadas imagens dos dois tipos de materiais:



Figura 4.2 – a) Camada de areia argilosa (SC); b) Camada de agregado esmagado (CA31,5) sobre a camada de areia argilosa; (Martins, 2011).

Estes dois materiais foram sujeitos a ensaios de laboratório com o objetivo de determinar os parâmetros de identificação do solo. Neste sentido foram realizados os seguintes ensaios de identificação; limites de Atterberg, curva granulométrica, peso específico, teor em água e absorção do azul metileno, cujo os resultados para a areia argilosa se apresentam na Figura 4.3 e 4.4.

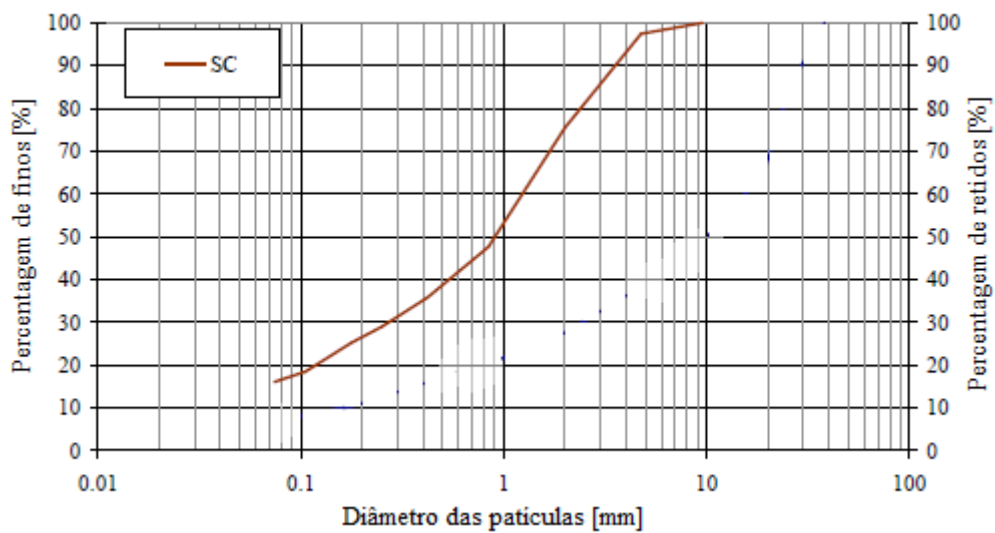


Figura 4.3 – Curva granulométrica da areia argilosa (SC), (Martins, 2011).

Ensaio de identificação e compactação do solo		
Ensaio		Material Areia argilosa SC
Limites de Atterberg	$w_L$	32
	$w_P$	21
	$I_P$	11
Peso específico		2,65
Azul Metileno		0,96
Areia Equivalente		24
Proctor modificado	$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]	20,14
	w [%]	8,6

Figura 4.4 – Resultados dos ensaios de identificação dos materiais, adaptado de (Martins, 2011).

Para determinar os valores de teores em água e peso volúmico in-situ, realizaram-se dois tipos de ensaios: o ensaio de garrafa de areia e o método radioativo (Martins, 2011). Note-se que os valores obtidos através do método radioativo foram corrigidos com base nos valores do ensaio de garrafa de areia de acordo com a expressão apresentada por Martins (2011).

## 4.2 Descrição do método de análise

A metodologia de análise dos resultados tem por base dois tipos de análises: uma análise gráfica e uma análise espacial.

A análise gráfica teve como objetivos a identificação da existência de correlações dos resultados apresentados pelos diferentes ensaios in-situ, comparar os resultados obtidos em campo com os resultados apresentados em diversa bibliografia e ainda identificar a influência das condições de estado nos resultados apresentados pelos diferentes ensaios in-situ.

A análise espacial teve como objetivos a análise do comportamento mecânico das diferentes camadas de aterro a partir dos valores apresentados pelos ensaios in-situ realizados em vários pontos da camada e através de métodos de interpolação avaliar o comportamento mecânico ao longo de toda a camada. A partir do cruzamento dos dados relativos às condições de estado, pretende-se ainda inferir qual a influência das diferentes condições de estado no comportamento mecânico das camadas de aterro.

#### **4.2.1 - Análise gráfica**

Como foi referido no Capítulo 1, um dos objetivos do trabalho seria avaliar a influência do teor em água e do índice de vazios no comportamento mecânico das camadas do aterro em estudo, particularmente no módulo de deformabilidade. Para tal utilizaram-se os resultados dos ensaios in-situ obtidos em Martins (2011). A análise consistiu em agrupar os resultados dos módulos de deformabilidade obtidos nos ensaios de carga em placa (ECP), Geogauge (SSG), defletómetro de impacto ligeiro (DIP) e portancèmetre (PORT), por valores de teor em água, índice de vazios e grau de saturação.

As relações entre os valores dos módulos de deformabilidade dos vários ensaios foram obtidas através de regressões lineares e coincidiram com o número de combinações possíveis entre os ensaios, ou seja realizaram-se gráficos do tipo, ECP-DIP, ECP-SSG, ECP-PORT, PORT-DIP, PORT-SSG e DIP-SSG. Os gráficos realizados contém várias séries, com os valores dos módulos de deformabilidade agrupados por intervalos de teores em água de 0,5 %, intervalos de grau de saturação de 5%, e intervalos de índice de vazios de 0,4. Para cada gráfico foi calculado a regressão linear e os respetivos coeficientes de determinação que posteriormente permitiu efetuar uma avaliação e obter conclusões sobre as várias relações.

#### **4.2.2 - Análise espacial**

A modelação geostatística do módulo de deformabilidade do aterro em estudo, foi efetuada com recurso ao programa ArcGis da ESRI, nomeadamente as extensões Geostatistical Analyst e Spatial Analyst (ESRI, 2001). O ArcGis é um sistema de informação geográfica que permite realizar uma análise espacial da superfície em estudo aplicando vários métodos de interpolação.

Como se percebe, realizar ensaios em toda a área do aterro não seria possível, porque como já foi referido na descrição dos ensaios, a maioria são ensaios pontuais. Como tal foram realizados vários ensaios de cada tipo de ensaio em quadrículas do aterro devidamente identificadas e, por interpolação espacial determinou-se o módulo de deformabilidade de toda a área do aterro. Para a interpolação espacial do módulo de deformabilidade do aterro utilizaram-se dois métodos: o IDW (Inverse Distance Weighted) e o método Kriging.

O IDW (Inverse Distance Weighted), é um método determinístico de interpolação que se baseia na determinação de onde a superfície de interpolação deve ser mais influenciada. Este método assume que a variável a ser interpolada é menos influente quanto maior for a distância da localização da amostra. Deste modo, a superfície de interpolação é uma média ponderada dos pontos obtidos nos ensaios, e o peso de cada um diminui à medida que a distância entre o ponto de interpolação e o ponto que se deseja obter o valor aumenta (Aguiar, 2010).

O método Kriging, é um método geoestatístico que assume que a distância entre os pontos obtidos nos ensaios refletem uma correlação espacial que pode ser usado para explicar a variação na superfície. Enquanto no método de interpolação IDW, o peso de cada célula depende apenas da distância para a previsão, no método Kriging além das previsões dependerem da distância, também dependem do arranjo geral espacial entre os pontos medidos e os seus valores. Para se usar o arranjo espacial dos pesos a atribuir a cada previsão, a auto-correlação deve ser quantificada. Existem vários tipos de modelos Kriging, mas neste trabalho apenas utilizou-se o método kriging mais comum (Ordinary kriging), visto que para se atingir os objetivos propostos neste tipo de análise apenas seria necessário obter a interpolação entre os pontos tendo em conta a distância. No ordinary kriging, o peso a atribuir a cada célula, depende de um modelo ajustado para os pontos medidos, a distância para a localização da previsão, e as relações espaciais entre os pontos da malha em torno do local da previsão (ESRI, 2002).

Atendendo ao tipo de dados a analisar, o método determinístico (IDW) foi o utilizado na grande maioria das análises espaciais. Tal opção deve-se ao objetivo desta análise, a qual prende-se com a representação espacial do comportamento mecânico apresentado em campo através dos resultados dos ensaios pontuais realizados in-situ, sendo assim considerou-se que o método IDW é o método mais indicado uma vez que a sua base de

interpolação consiste na distância entre os pontos dos quais foram obtidos os resultados dos ensaios in-situ, desta forma é obtida uma simulação do comportamento de toda a extensão das camadas de aterro em análise tal como é pretendido.

### **4.2.3 - Ensaios de laboratório**

No decorrer do presente trabalho realizou-se uma campanha de ensaios de sucção em laboratório, de forma a verificar a relação entre a sucção e o teor em água, para um dado índice de vazios na compactação do aterro experimental em estudo.

O método utilizado em laboratório para a determinação da sucção, foi o método do papel de filtro, como foi referido no Capítulo 2.

Como o ensaio de sucção pelo método do papel de filtro, não é um ensaio normalizado, tentou-se realizar o ensaio a nível de procedimento da forma mais próxima do que nos é apresentado pela bibliografia (Fredlund, et al, 2011; Bicalho, et al, 2008), para deste modo se ter um ponto de comparação dos resultados obtidos com os resultados apresentados por Martins (2011) e por Barrera (2002). Deste modo, de acordo com o material e recursos disponíveis no laboratório, tentou-se aproximar o mais possível o procedimento utilizado na bibliografia, com o objetivo de se reduzir ao máximo todas as perdas que são normais nestes tipos de ensaios, nomeadamente na preparação dos provetes.

O primeiro passo consistiu em pesar papéis de filtro Whatman nº 42 de 90 mm de diâmetro, devidamente identificados. Para se efetuar as pesagens, utilizou-se uma balança analítica com resolução de quatro casas decimais como mostra a Figura 4.4.



Figura 4.4 – Balança analítica com resolução de 4 casas decimais.

Procedeu-se ao esquadramento da amostra em 10 porções de 460 g do material denominado areia argilosa (SC), tendo sido previamente realizada uma granulometria e calculado o teor em água existente no material.



(a)

(b)

Figura 4.5 – Esquadramento da amostra; a) Material a esquadrelar; b) Material esquadrelado;

De seguida, para cada 3 porções obtidas do esquadramento, adicionou-se água de forma a obter três teores em água distintos. Ficando três porções de material com teor em água de 4,5%, outras três com 6,5% e as restantes com 8,5%. Após a mistura, acondicionou-se bem as cápsulas que continham as respetivas misturas e deixou-se homogeneizar durante 24 horas.



Figura 4.6 – Amostra imediatamente após a mistura da água;  $w=8,5\%$

Após a homogeneização das misturas, realizou-se a preparação de 9 provetes para cada índice de vazios, com 25 mm de altura e 100 mm de diâmetro, com índices de vazios fixos de 0.331, 0.373, 0.419. Neste ensaio a compactação do provete realizou-se através de um método de compactação estática, utilizando para tal uma prensa hidráulica como é mostrado na Figura 4.7.

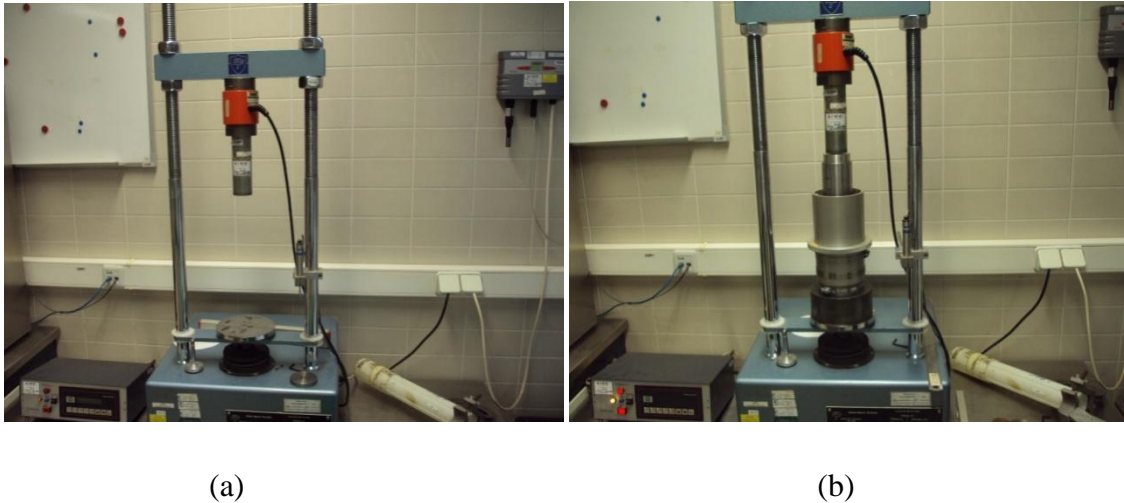


Figura 4.7 – Prensa hidráulica; a) Prensa hidráulica antes da compactação; b) Prensa hidráulica durante a compactação;

Recorreu-se então ao molde, que é apresentado na Figura 4.8, utilizando como base uma placa de perspex (acrílico), com diâmetro de 100 mm.

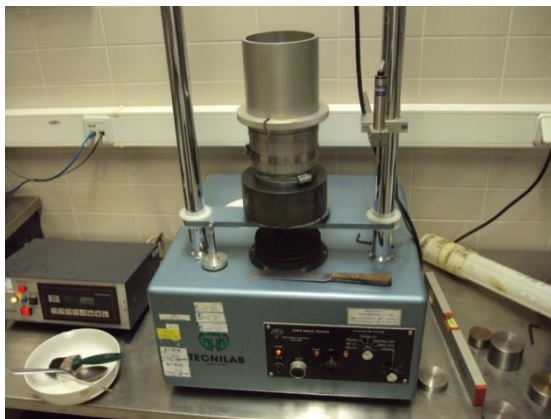


Figura 4.8 – Molde utilizado para a realização dos provetes.

Após concluído o processo de realização do provete, procedeu-se a pesagem do provete e medição do diâmetro e altura do mesmo. Colocou-se um papel de filtro em contacto com o provete, no topo e na base do mesmo, e sobre este foi colocada outra folha de papel de filtro que tinha sido previamente pesada. Este procedimento foi adotado de modo a garantir que o papel filtro utilizado para a medição indireta da sucção não esteja em contato direto com o solo, evitando assim a contaminação do papel com partículas de solo, logo evitando erros na pesagem do papel de filtro e, conseqüentemente, na determinação da sucção. Colocou-se uma placa de perspex no topo e na base do provete, de forma a garantir o contacto do papel de filtro com o solo. Na Figura 4.9 é apresentado o provete imediatamente após ser desenformado.



Figura 4.9 – Provette depois da compactação

De seguida, isolou-se o provete obtido com película aderente, voltou-se a pesar o provete com a película, e colocou-se o provete dentro de um saco hermético, deixando-se o provete a repousar, numa sala com temperatura controlada, a uma temperatura de 20 °C, durante cerca de pelo menos 7 dias. Na Figura 4.10 é apresentada a forma de como o provete foi condicionado de forma a não sofrer interagir com fatores exteriores.



a)

b)

Figura 4.10 – Isolamento e armazenamento dos provetes; a) Isolamento do provete com película aderente; b) Provetes finais em repouso na sala com temperatura controlada.

No final dos 7 dias, pesou-se novamente os papéis de filtro de cada provete, obtendo assim a massa do papel de filtro húmido. Seguidamente levou-se os papéis de filtro a estufa durante 24h, após qual voltou-se a pesar os respetivos papéis, obtendo-se assim a massa do papel de filtro seco. Através das várias pesagens do papel de filtro, e pelo que foi descrito no Capítulo 2, calcula-se o valor da sucção obtida em cada provete.



## Capítulo 5 - Análise de resultados

Como foi anteriormente descrito, um dos objetivos prende-se com a avaliação da influência que a variação das condições de estado, nomeadamente o índice de vazios e o teor em água, tem no comportamento mecânico das camadas de aterro compactadas. O segundo objetivo diz respeito ao estabelecimento de correlações dos valores de módulo de deformabilidade obtidos através dos diferentes ensaios in-situ (Ensaio de Carga em Placa (ECP), Defletómetro de impacto ligeiro (DIP), Geogauge (SSG), Portancèmetre (PORT)) e comparação com as correlações recolhidas na pesquisa bibliográfica.

Assim, de seguida apresentam-se, em primeiro lugar, os resultados da campanha de ensaios realizada em laboratório e, em segundo lugar, o resultado da análise dos ensaios de campo, quer através do estabelecimento de correlações, quer através de uma análise espacial.

### **5.1 Ensaios de laboratório**

Como foi descrito anteriormente no Capítulo 4, a parte laboratorial deste trabalho consistiu na realização de várias campanhas de ensaios de sucção realizados através do método do papel de filtro. Este estudo laboratorial foi realizado de modo a perceber de que forma as condições de estado, nomeadamente o índice de vazios e o teor em água influenciam os valores da sucção. Como foi apresentado na revisão bibliográfica, a sucção tem grande importância no comportamento mecânico de camadas de aterro em condições de não saturação do solo. Logo, se a sucção é influenciada pelos valores das condições de estado, significa que através do controlo das condições de estado é possível prever a influência da sucção no comportamento mecânico das camadas de aterro.

Para tal, o trabalho laboratorial consistiu na realização de 3 campanhas de ensaios de sucção em que, foram realizados provetes para três valores de índice de vazios diferentes como é apresentado pela tabela da Figura 5.1.

e = 0,373		
Índice de vazios, e	Teor em água, w (%)	Grau de saturação, S (%)
0,373	4,5	32,0
0,377	4,4	30,9
0,383	4,4	30,5
0,367	6,4	46,3
0,369	6,4	45,9
0,371	6,5	46,4
0,375	8,4	59,4
0,365	8,3	60,3
0,366	8,4	60,9
0,374	10,3	73,1
0,372	10,3	73,5
0,372	10,3	73,4
e = 0,331		
0,334	4,3	34,1
0,337	4,5	35,4
0,334	4,4	34,9
0,332	6,3	50,3
0,335	6,4	50,6
0,336	6,5	51,3
0,332	8,4	67,0
0,336	8,4	66,3
0,335	8,4	66,4
e = 0,419		
0,422	4,4	27,6
0,423	4,6	28,8
0,426	4,4	27,4
0,415	6,4	40,9
0,413	6,4	41,1
0,416	6,4	40,8
0,416	8,4	53,5
0,425	8,4	52,4
0,417	8,4	53,4
0,416	10,5	66,9
0,415	10,4	66,4
0,420	10,4	65,6

Figura 5.1 – Tabela com os dados das condições de estado aplicadas a cada provete.

A equação de calibração utilizada foi a apresentada por (Chandler et al., 1992) que é apresentada pela Equação 5.1.

$$\text{Log}_{10}(\text{sucção}) = \begin{cases} 4,842 - 0,0622 \cdot \omega & \text{com } \omega < 47 \\ 6,050 - 2,18 \cdot \text{Log}_{10}(\omega) & \text{com } \omega > 47 \end{cases} \quad \text{Equação 5.1}$$

As sucções obtidas para o intervalo de teores em água de 4% inferiores ao ótimo até aos 2% superiores ao ótimo estiveram numa gama de valores compreendidos ente 644,33 e 6,24 kPa respetivamente. Verificou-se o decréscimo da sucção com o aumento do grau de saturação (Sr) de acordo com a Figura 5.2. No entanto verifica-se que as diferenças entre os valores de sucção são inferiores para valores de grau de saturação inferiores, verificando-se também maiores diferenças superiores para os maiores graus de saturação.

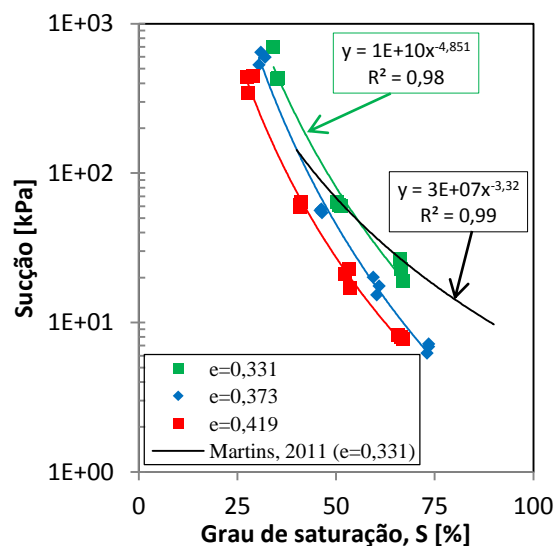


Figura 5.2 – Sucção versus grau de saturação para todos os índices de vazios ensaiados, e representação da curva apresentada em Martins (2011).

Os resultados apresentados pelos gráficos da Figura 5.2 mostram que apesar da mudança dos valores de índices de vazios, os valores de sucção decrescem ao longo do aumento dos valores de grau de saturação. Ainda do gráfico da Figura 5.2 verificou-se um acréscimo dos valores de sucção com o decréscimo dos valores de índice de vazios.

Os resultados apresentados quando comparados com os resultados apresentados por Barrera (2002) e indicados na Figura 2.2.4 no Capítulo 2 apresentam as mesmas conclusões relativamente a influência do índice de vazios na variação da sucção.

Os resultados dos ensaios de laboratório quando comparados com os ensaios apresentados por Martins (2011) apresentam algumas alterações na curva, apesar de terem sido utilizadas as mesmas condições de estado em ambos os ensaios (fig. 5.2). Estas alterações podem ser justificadas pelo facto dos ensaios apresentados por Martins (2011) terem sido realizados a partir de uma compactação dinâmica das amostras enquanto no presente trabalho foi utilizada a compactação estática das amostras. Segundo Sivakumar and Wheeler (2000), a utilização de diferentes tipos de compactação poderá traduzir em diferentes estruturas de material das amostras a ensaiar. Denote-se que apesar das curvas não serem idênticas as conclusões a retirar são semelhantes, pois a tendência das duas curvas é a mesma.

## **5.2 Avaliação da influência da variação das condições de estado no comportamento mecânico das camadas de aterro.**

O estudo foi conduzido para diferentes camadas de aterro, com 30 cm de espessura com os valores de teor em água 2% inferiores ao ótimo (30cm\_w-2), com 50 cm de espessura com os valores de teor em água 2% inferiores ao ótimo (50cm\_w-2), com 40 cm de espessura com os valores de teor em água 2% inferiores ao ótimo (40cm\_w-2), equivalente ao ótimo (40cm\_wo) e com 2% superiores ao ótimo (40cm\_w+2), tendo sido realizadas dois tipos de análise: análise gráfica e análise espacial. Note-se ainda que estas foram realizadas para diferentes energias de compactação.

É importante realçar que dos quatro ensaios in-situ realizados, três deles (ECP, DIP, SSG) são ensaios pontuais, e foram realizados pontualmente em algumas das quadrículas (5x2m<sup>2</sup>) definidas no capítulo 4, sendo o ensaio designado por Portancèmetre um ensaio contínuo. Neste caso os dados recolhidos continuamente ao longo da camada com leituras realizadas em intervalos de aproximadamente 1 m de distância, foram posteriormente tratados de forma a se obter uma média dos valores obtidos por cada quadrícula, de modo a apresentar um valor para cada quadrícula. Assim utilizaram-se os valores de médias por quadrícula (5x2 m<sup>2</sup>) dos ensaios Portancèmetre de forma a realizar as correlações com os restantes ensaios pontuais.

## **5.2.1 - Comparação dos resultados dos ensaios in-situ**

### **5.2.1.1 - Análise gráfica**

A análise de resultados consistiu na comparação dos valores obtidos correspondentes:

- i) A todas as energias de compactação aplicadas a camada;
- ii) À energia de compactação correspondente ao último nível de energia, ou seja, às 12 passagens do cilindro;

Esta distinção deve-se, por um lado, à maior homogeneidade das condições de estado para o último nível de energia, e por outro, pelo facto da avaliação da qualidade de construção das camadas de aterro se efetuar para o último nível de energia aplicado.

Assim tendo em vista o estudo da influência das condições de estado no comportamento mecânico das camadas de aterro, para cada uma das comparações, a análise, consistiu numa primeira fase, no estabelecimento de correlações entre os resultados obtidos nos diferentes ensaios in-situ realizados para a determinação dos módulos de deformabilidade, E, com estes agrupados por intervalos de índices de vazios e teor em água. Numa segunda fase estabeleceram-se correlações com os resultados agrupados por intervalos de valores de grau de saturação, uma vez que este parâmetro é calculado com base no valor de índice de vazios e de teor em água, ou seja, integra os dois índices físicos cuja influência no comportamento mecânico se pretende avaliar.

A análise detalhada das correlações obtidas entre os vários ensaios in-situ realizados foi efetuada por camada, ou seja, para cada camada de aterro foi realizada uma análise semelhante. Saliente-se contudo, que apenas serão apresentados os resultados correspondentes às correlações com os coeficientes de determinação mais elevados.

#### **5.2.1.1.1 - Camada de 30 cm com valores de teores em água 2% inferiores ao ótimo.**

- i) **Todos os níveis de energia de compactação**

A análise das correlações obtidas através do estudo da camada de 30cm, com um teor em água inferior ao teor em água ótimo na ordem dos 2%, sendo esta designada por

30cm\_w-2, permitiu verificar fracas correlações entre os resultados apresentados pelos ensaios in-situ (ECP, DIP, SSG e PORT), para todos os níveis de energia.

Na Figura 5.3 apresentam-se os gráficos das duas melhores correlações entre os valores de módulos de deformabilidade obtidos pelos diferentes ensaios in-situ, onde a correlação realizada entre o ensaio ECP e o DIP apresenta um coeficiente de determinação,  $R^2=0,42$ , e a correlação entre o ensaio DIP e o SSG apresenta um  $R^2=0,38$ .

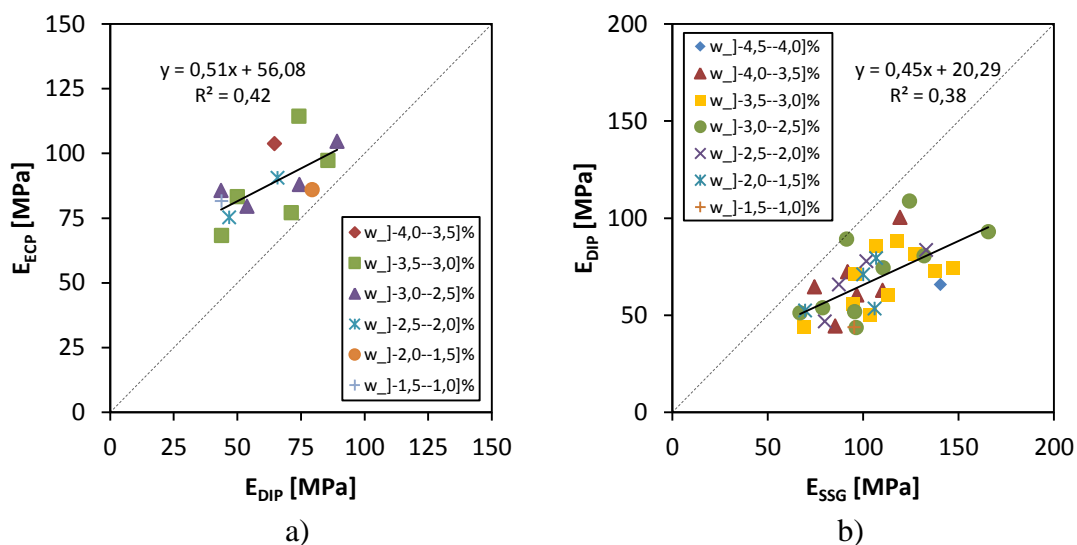


Figura 5.3 – Correlações apresentadas entre os vários ensaios in-situ para todos os níveis de energia com os dados agrupados por intervalos de teor em água: a) ECP-DIP; b) DIP-SSG

A análise da influência do teor em água não é de fácil visualização, como é apresentado pela Figura 5.3, pois para um mesmo intervalo de teor em água os módulos de deformabilidade apresentados abrangem toda a gama de valores obtidos na correlação. Logo na camada de 30cm\_w-2, para o conjunto global dos módulos de deformabilidade apresentados em todos os níveis de energia, não foi possível estabelecer uma relação direta no comportamento mecânico da camada com a alteração dos intervalos de valores de teor em água.

A análise das mesmas correlações, mas desta feita com os dados agrupados por intervalos de valores de índices de vazios, é apresentada pela Figura 5.4 e mostra a mesma distribuição dos valores que foi identificada na Figura 5.3, pelo que, para o

conjunto global dos módulos de deformabilidade apresentados para todos os níveis de não foi possível estabelecer qualquer relação direta da influência do índice de vazios no comportamento mecânico da camada.

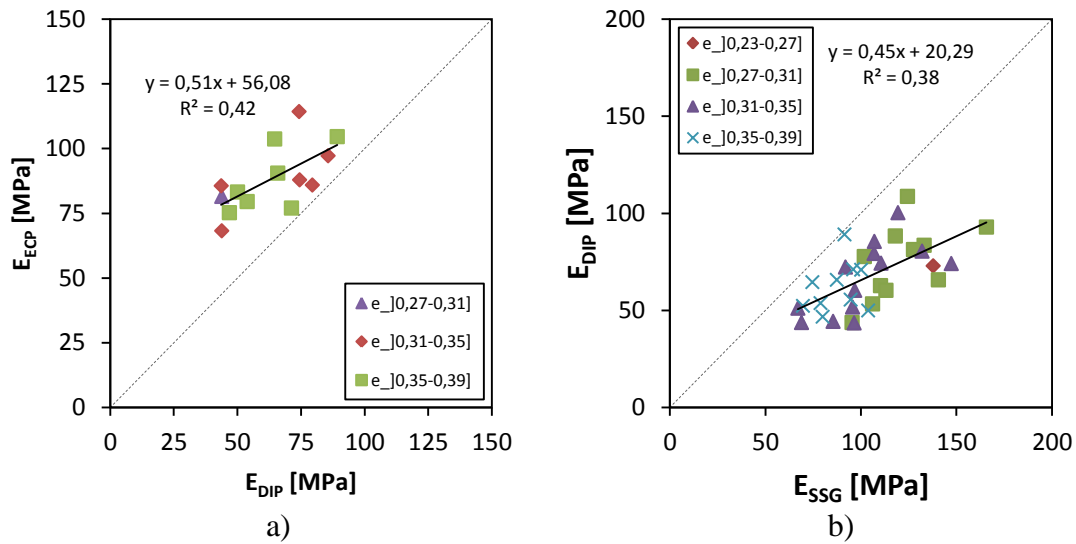


Figura 5.4 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de índice de vazios; a)ECP-DIP; b) DIP-SSG

Por sua vez, a análise dos mesmos dados quando agrupados por intervalos de valores de grau de saturação, continuam a não permitir identificar uma influência do grau de saturação no comportamento mecânico da camada em análise, uma vez que para o mesmo intervalo de valores de grau de saturação foram obtidos valores de módulos de deformabilidade que abrangem toda a gama de valores obtida ao longo da camada. Os resultados descritos são apresentados pela Figura 5.5.

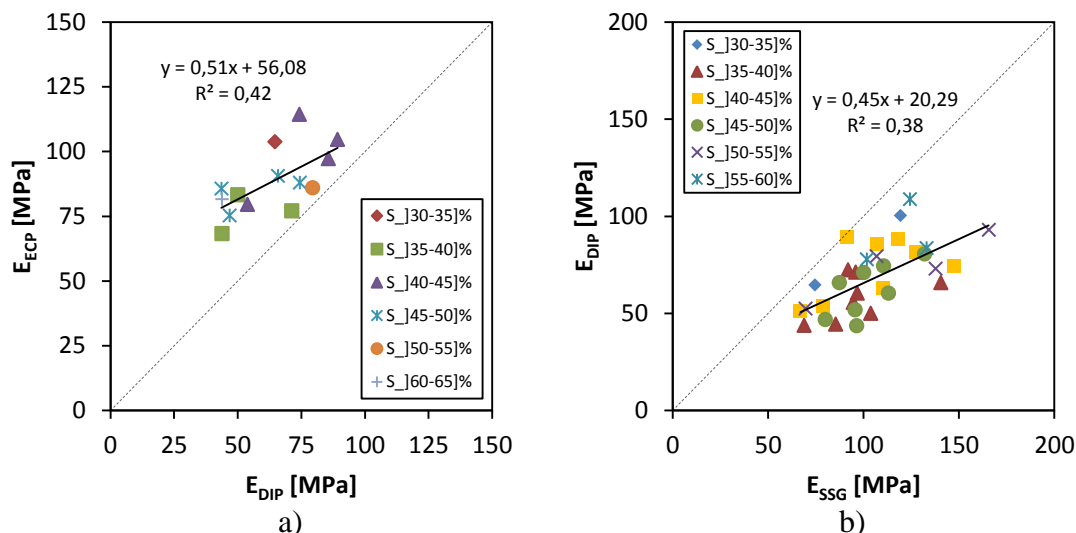


Figura 5.5 - Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de grau de saturação; a)ECP-DIP; b) DIP-SSG

## ii) Último nível de energia de compactação (12 Passagens)

Na Figura 5.6 são apresentados os gráficos das duas melhores correlações entre os valores de módulos de deformabilidade obtidos pelos diferentes ensaios in-situ. Como pode ser verificado as correlações apresentam valores de coeficientes de determinação reduzidos, tendo sido obtido um  $R^2=0,32$  para a comparação entre o ensaio Portancèmetre e o SSG, e um  $R^2=0,55$  para quando comparados os ensaios DIP e o SSG.

A análise da influência do teor em água não é de fácil visualização, como é apresentado pela Figura 5.6. Verifica-se uma tendência dos valores apresentados pelo ensaio SSG, que tendem a diminuir para valores de teor em água superiores. A tendência verificada apenas para os resultados do ensaio SSG pode ser explicada pelo facto de no referido ensaio a deformação do solo é muito reduzida, pelo que o teor em água irá apresentar maior influência para o SSG do que para os restantes ensaios in-situ. No entanto, esta tendência não pode ser confirmada devido ao reduzido número resultados apresentados para o último nível de energia de compactação e por existirem resultados na Figura 5.6 que contradizem esta mesma tendência. Apesar do reduzido número de ensaios apresentados para o último nível de energia, a tendência enunciada está de acordo com os resultados apresentados pelos ensaios de laboratório (Figura 5.2).

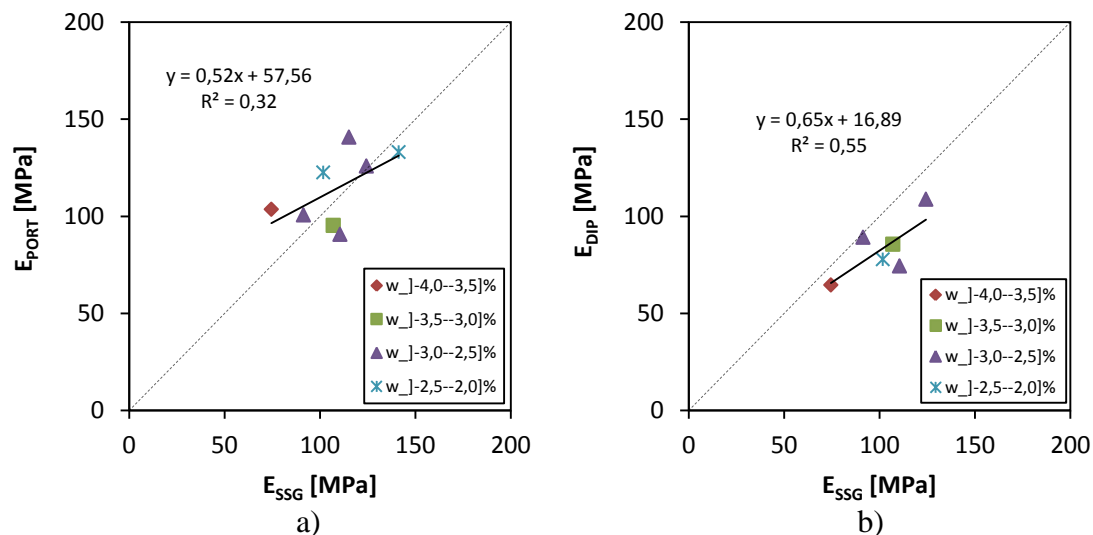


Figura 5.6 – Correlações apresentadas entre os vários ensaios in-situ para o último nível de energia de compactação (12 passagens) com os dados agrupados por intervalos de teor em água: a) PORT- SSG; b) DIP-SSG

A análise das correlações com os dados agrupados por intervalos de valores de índice de vazios (Figura 5.7) mostra uma tendência no sentido de que para os índices de vazios inferiores são apresentados valores de módulos de deformabilidade superiores. A tendência verificada é reforçada pelos resultados apresentados pelos ensaios de laboratório (Figura 5.2) que indicam que para um menor valor de índice de vazios são apresentados maiores valores de sucção.

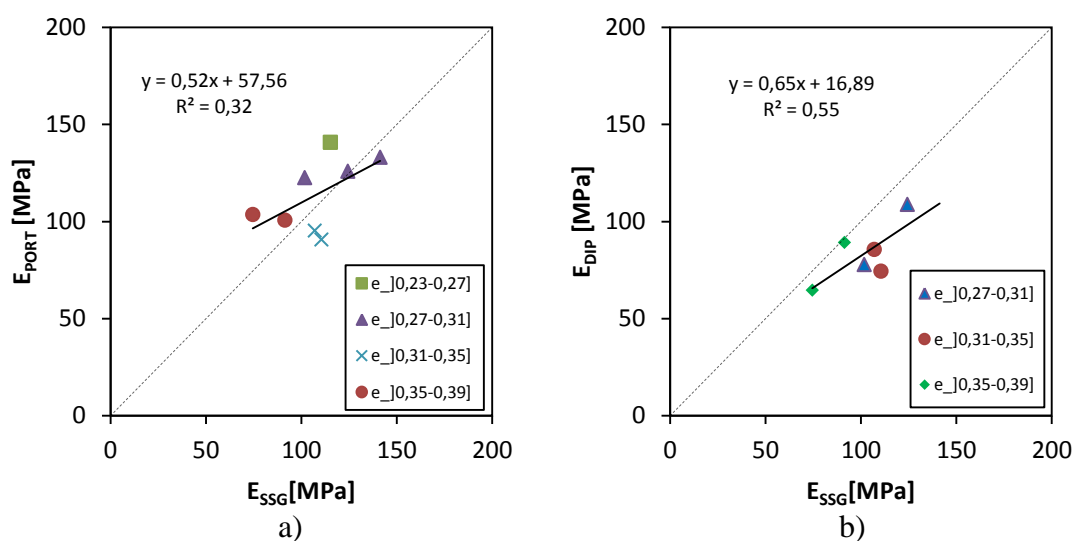


Figura 5.7 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de índices de vazios; a) PORT-SSG; b) DIP-SSG.

Desta feita, as mesmas correlações com os resultados agrupados por intervalos de grau de saturação, mostram uma tendência no sentido de quanto maior é o grau de saturação maior é o valor de módulo de deformabilidade apresentado, como é apresentado pela Figura 5.8. No entanto, o reduzido número de ensaios realizados para o último nível de energia (12 passagens) e alguns resultados discordantes não permitem confirmar a tendência verificada. A tendência verificada não é confirmada pelos ensaios de laboratório pois estes indicam a tendência oposta a apresentada pelos gráficos da Figura 5.8.

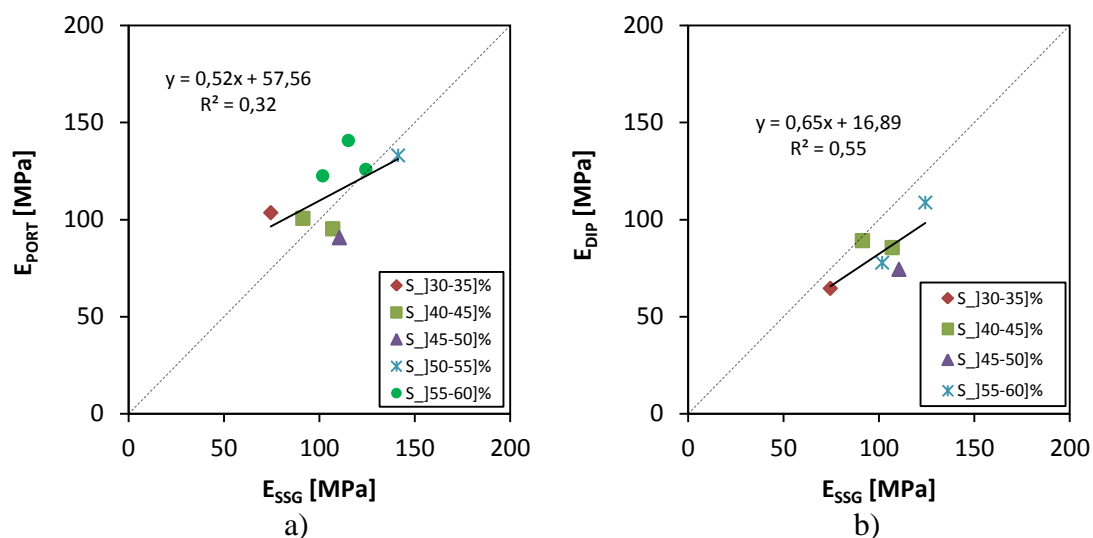


Figura 5.8 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de grau de saturação; a) PORT-SSG; b) DIP-SSG.

### 5.2.1.1.2 - Camada de 40 cm com valores de teores em água 2% inferiores ao ótimo (40cm\_w-2)

#### i. Todos os níveis de energia de compactação.

A análise das correlações obtidas através do estudo da camada de 40cm, com um teor em água inferior ao teor em água ótimo na ordem dos 2%, sendo esta designada por 40cm\_w-2, permitiu verificar fracas correlações entre os resultados obtidos pelos ensaios in-situ (ECP, DIP, SSG, PORT), para todos os níveis de energia.

Na Figura 5.9 apresentam-se os gráficos das correlações entre os valores de módulos de deformabilidade obtidos pelos diferentes ensaios in-situ, onde a verificou-se que

praticamente não existe variação dos valores de módulos de deformabilidade apresentados pelos ensaios DIP e PORT.

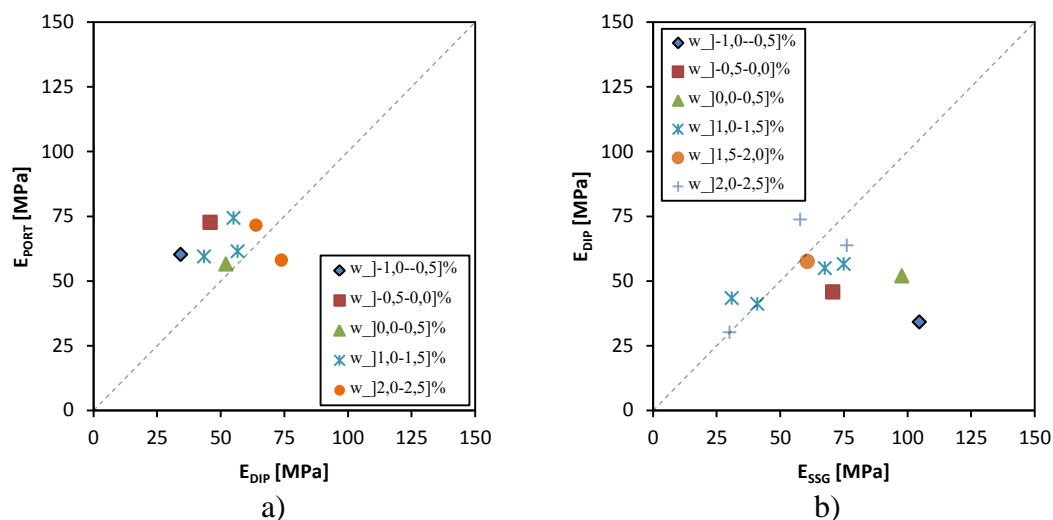


Figura 5.9 – Correlações apresentadas entre os vários ensaios in-situ para todos os níveis de energia com dados agrupados por intervalos de teor em água: a) PORT-DIP; b) DIP-SSG.

A análise da influência do teor em água não é fácil visualização, como é apresentado pela Figura 5.9. No entanto verifica-se que os resultados dos ensaios PORT e DIP não são influenciados pelo teor em água, pois não apresentam variação com a alteração deste parâmetro. Os resultados apresentados pelo SSG mostram que para teores em água superiores são apresentados módulos de deformabilidade inferiores. Esta tendência vai no encontro do que foi verificado na camada de 30cm e pelos ensaios realizados em laboratório.

A análise das mesmas correlações, mas desta feita com os dados agrupados por intervalos de valores de índice de vazios (Figura 5.10), mostram que para o mesmo intervalo de índice de vazios são apresentados valores para os módulos de deformabilidade que abrangem toda a gama de resultados, pelo que não foi possível identificar qualquer relação entre o índice de vazios e o módulo de deformabilidade para as condições apresentadas por esta camada.

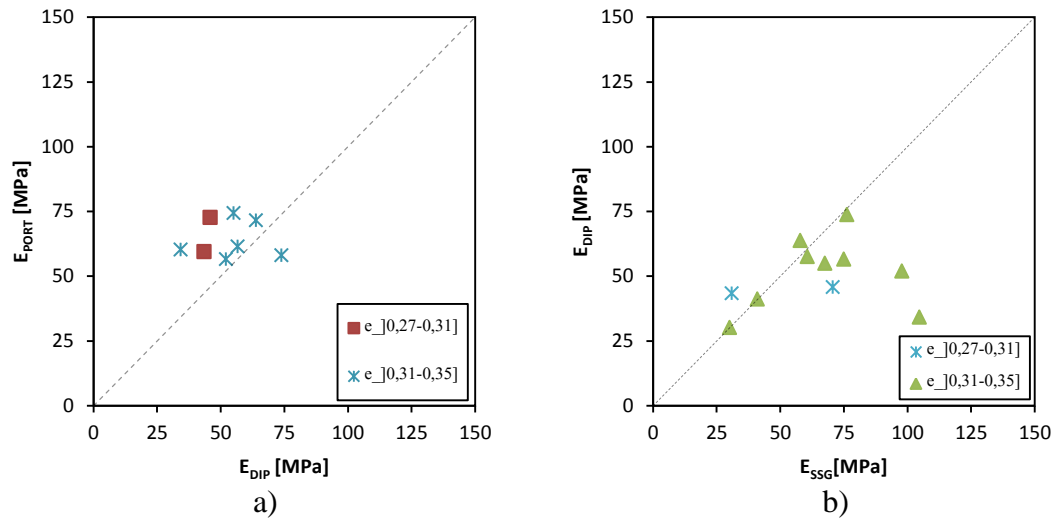


Figura 5.10 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de valores de índice de vazios; a) PORT-DIP; b) DIP-SSG.

A análise dos mesmos dados quando agrupados por intervalos de valores de grau de saturação (Figura 5.11), mostra que os resultados para o ensaio SSG apresentam a mesma tendência que foi identificada nas presentes correlações quando agrupadas em intervalos de teores em água, no sentido de apresentar maiores valores de módulos de deformabilidade para os intervalos de grau de saturação inferiores.

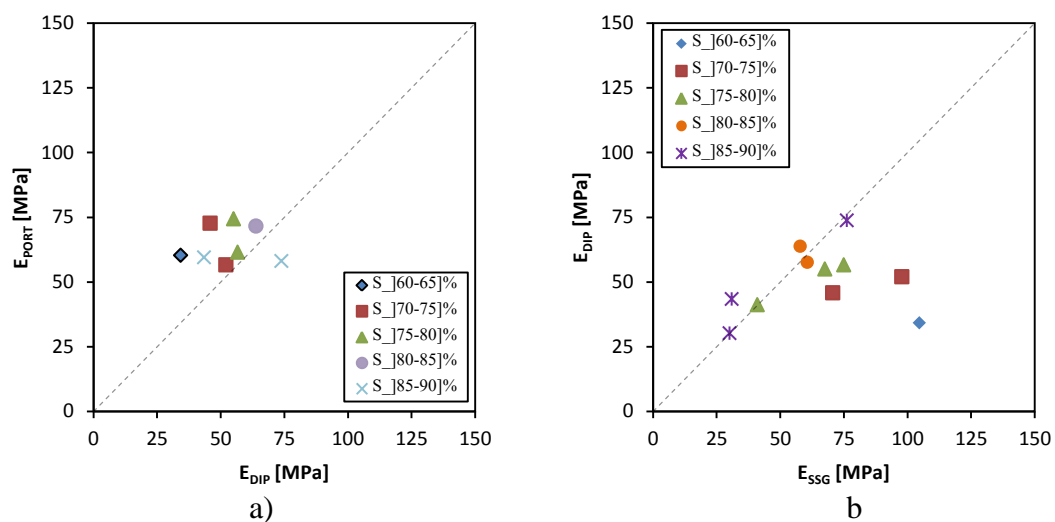


Figura 5.11 – Correlações entre ensaios com dados agrupados por intervalos de grau de saturação; a) PORT-DIP; b) DIP-SSG.

Denote-se que a camada de 40cm\_w-2 foi construída sobre a camada de 30cm\_w-2, o que pode explicar as fracas correlações obtidas para a camada de 40cm\_w-2 uma vez que como analisado, a camada de 30cm\_w-2 apresenta heterogeneidade relativamente as condições de estado ao longo da sua extensão

## ii. Último nível de energia de compactação (12Passagens)

Devido ao reduzido número de dados disponíveis para o último nível de energia de compactação, não foi possível realizar uma análise, pois considerou-se que apenas três resultados não eram representativos do comportamento mecânico da camada.

### 5.2.1.1.3 - Camada de 40 cm com valores de teores em água referentes ao ótimo (40cm\_wo)

#### i. Todos os níveis de energia de compactação

A análise das correlações obtidas através do estudo da camada de 40cm\_wo, permitiu verificar fracas correlações entre os resultados apresentados pelos ensaios in-situ (ECP, DIP, SSG e PORT), para todos os níveis de energia.

Na Figura 5.12 apresentam-se os gráficos das duas melhores correlações entre os valores de módulos de deformabilidade obtidos pelos diferentes ensaios in-situ, onde a correlação realizada entre o ensaio DIP e o SSG, apresenta um coeficiente de determinação,  $R^2=0,25$ , e a correlação apresentada entre o ensaio PORT e o DIP que apresentou um  $R^2=0,13$ .

A análise da influência do teor em água no comportamento mecânico da camada de aterro não é verificada como apresentado pela Figura 5.12, pois os dados apresentam-se muitos concentrados numa pequena área, e distribuídos de modo desorganizado existindo situações em que para o mesmo intervalo de teor em água, os módulos de deformabilidade apresentados abrangem toda a gama de valores obtidos na correlação.

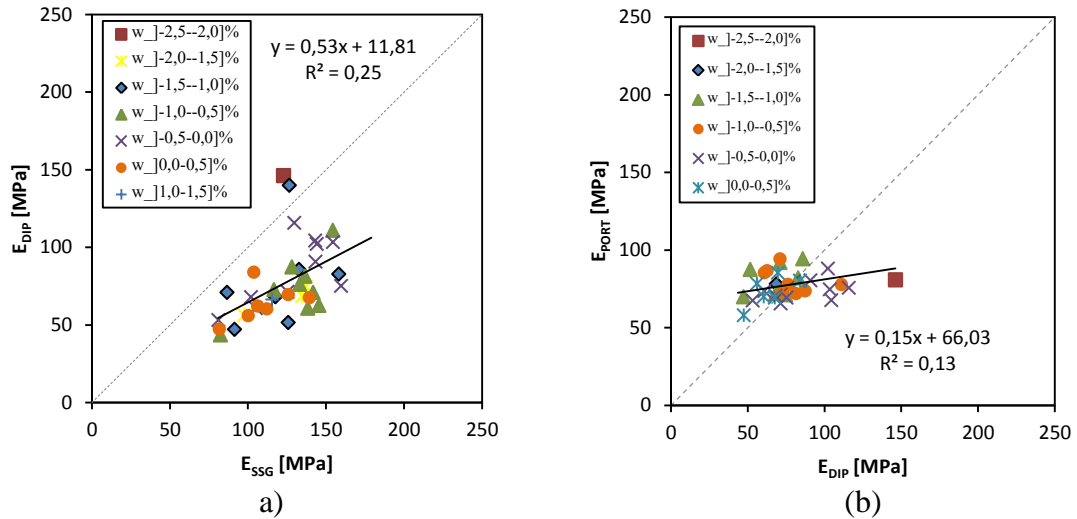


Figura 5.12 – Correlações apresentadas entre os ensaios in-situ para todos os níveis de energia com os dados agrupados por intervalos de teor em água: a) DIP-SSG; b) PORT-DIP.

A análise das mesmas correlações, mas desta feita com os dados agrupados por intervalos de valores de índice de vazios mostram uma tendência no sentido de quanto maior é o índice de vazios menor é o módulo de deformabilidade (Figura 5.13a), resultado que vai no encontro das conclusões apresentadas pelos ensaios de laboratório. A Figura 5.13 apresenta as correlações com os dados agrupados por intervalos de valores de índice de vazios.

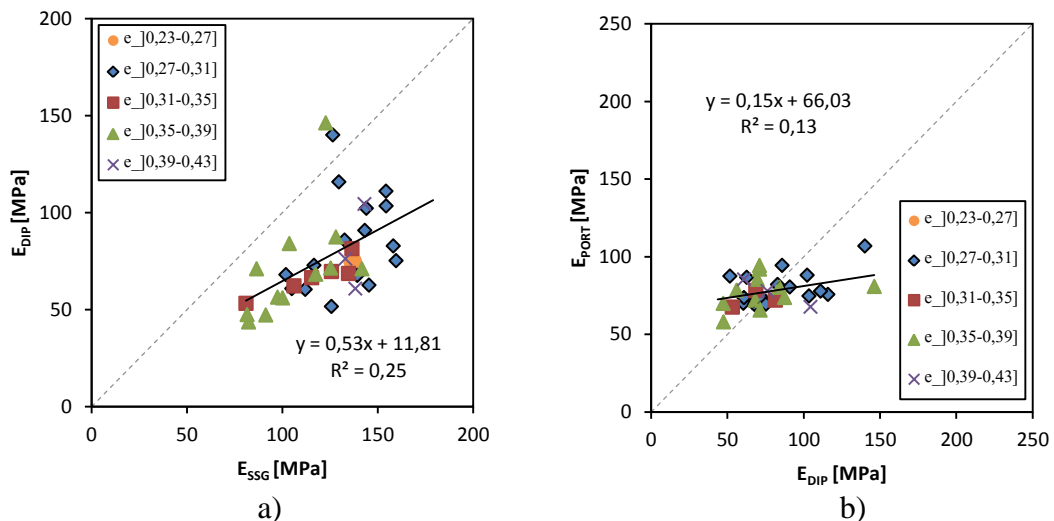


Figura 5.13 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de índice de vazios; a) DIP-SSG; b) PORT-DIP.

Por fim, a análise dos mesmos dados quando agrupados por intervalos de valores de grau de saturação, e apresentados na Figura 5.14, mostra uma concentração muito densa de resultados, logo não permitindo estabelecer uma relação direta do comportamento mecânico da camada com a alteração dos valores de grau de saturação.

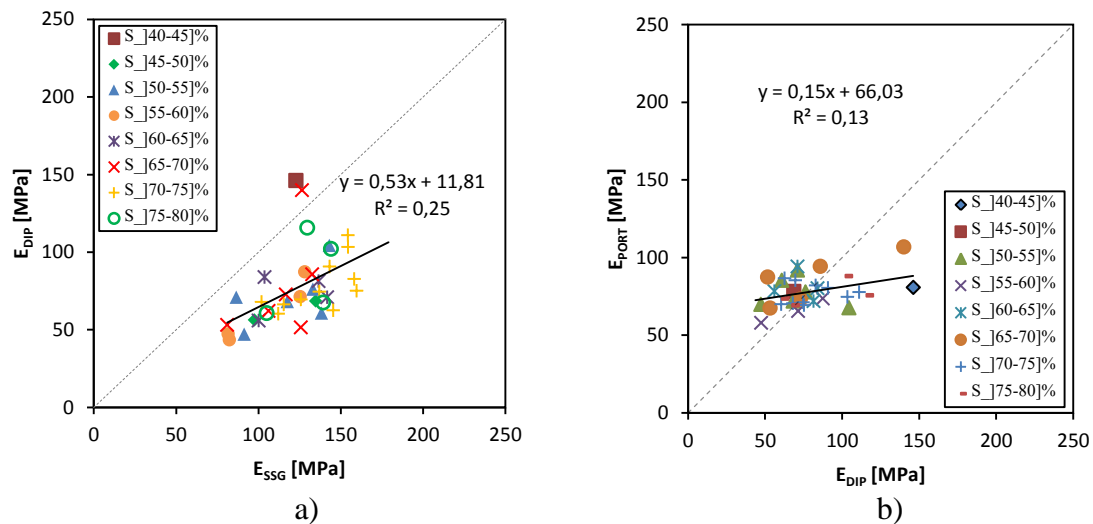


Figura 5.14 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de grau de saturação; a) DIP-SSG; b) PORT-DIP.

## ii. Último nível de energia de compactação (12 Passagens)

A Figura 5.15 apresenta as melhores correlações entre os valores de módulos de deformabilidade obtidos pelos diferentes ensaios in-situ, onde a correlação realizada entre o ensaio Portancèmetre e o DIP, apresenta um coeficiente de determinação,  $R^2=0,23$ .

A análise da influência do teor em água apresentada na Figura 5.15 mostra uma tendência no sentido de indicar que para intervalos de valores de teor em água superiores são obtidos valores inferiores de módulo de deformabilidade. Esta tendência é apenas identificada nos resultados apresentados pelo ensaio DIP em ambos os gráficos da Figura 5.15. Contudo esta tendência é reforçada pelos resultados apresentados nos ensaios de laboratório descritos na secção 5.2, que indicam que os valores da sucção diminuem com o aumento do grau de saturação, logo como a sucção está diretamente relacionada com as tensões efetivas e estas com os valores de módulos de deformabilidade, e o teor em água com o grau de saturação pode-se obter comparações

diretas entre os resultados apresentados in-situ com os resultados obtidos em laboratório.

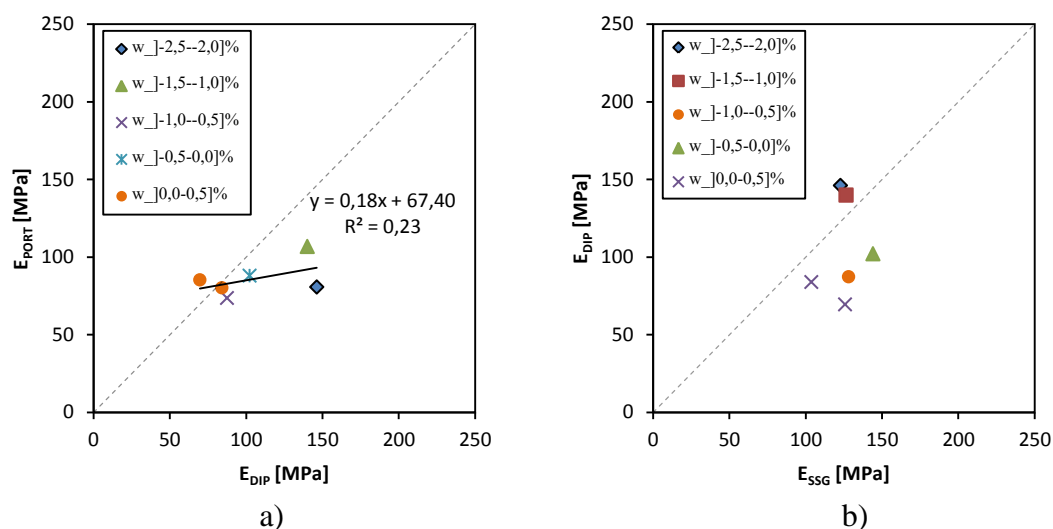


Figura 5.15 – Correlações apresentadas entre os vários ensaios in-situ para o último nível de energia de compactação (12 Passagens) com os dados agrupados por intervalos de teor em água: a) PORT-DIP; b) DIP-SSG.

A análise das mesmas correlações, com os dados agrupados por intervalos de índice de vazios (Figura 5.16), mostra que os resultados apresentados pelo ensaio DIP mostram uma certa tendência no sentido que são obtidos módulos de deformabilidade superiores para os menores intervalos de índice de vazios. Esta tendência está de acordo com os resultados apresentados pelos ensaios de laboratório.

Por sua vez, a análise dos mesmos dados quando agrupados por intervalos de valores de grau de saturação (Figura 5.17) mostra que existe uma variação de resultados de módulos de deformabilidade para cada intervalo do parâmetro, no entanto essas variações não apresentam qualquer tendência que indique que o módulo de deformabilidade é influenciado pelo grau de saturação.

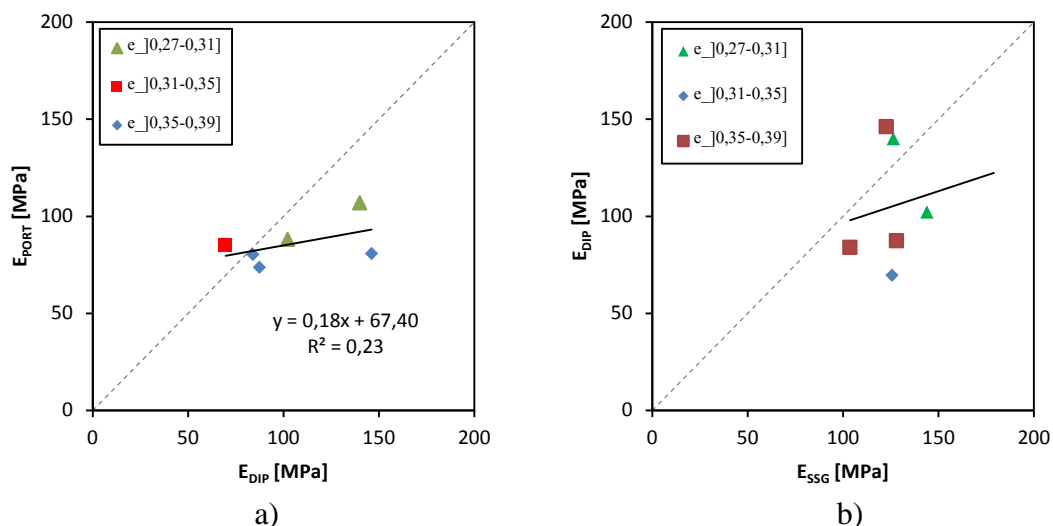


Figura 5.16 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de índice de vazios; a) PORT-DIP; b) DIP-SSG.

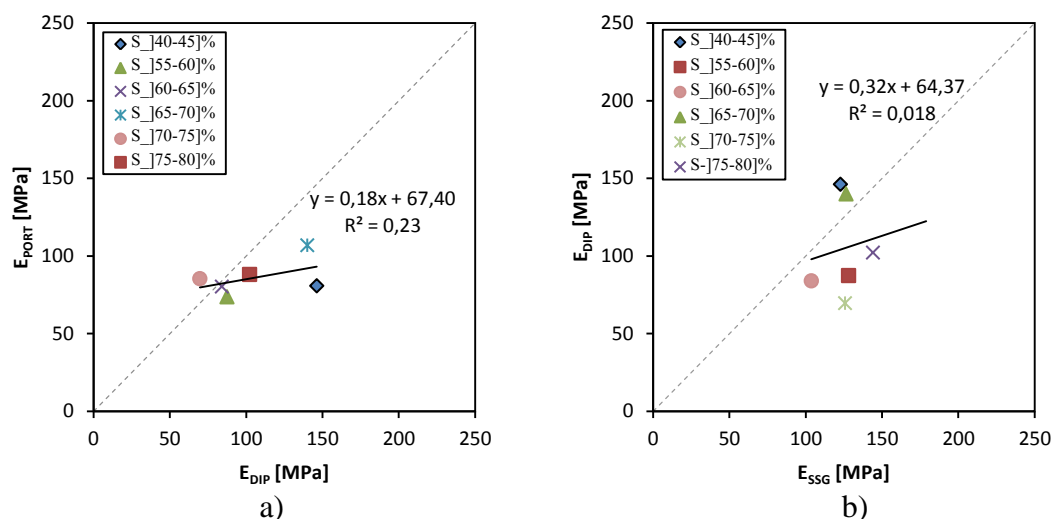


Figura 5.17 – Correlações entre os ensaios com os dados agrupados por intervalos de grau de saturação; a) PORT-DIP; b) DIP-SSG.

#### 5.2.1.1.4 - Camada de 40 cm com valores de teores em água 2% superiores ao ótimo (40cm\_w+2)

##### i. Todos os níveis de energia de compactação

A análise das correlações obtidas através do estudo da camada de 40cm, com os teores em água superiores ao teor em água ótimo na ordem dos 2 %, sendo esta designada por 40cm\_w+2, permitiu verificar fracas correlações entre os resultados apresentados pelos ensaios in-situ (ECP, DIP, SSG, PORT), para todos os níveis de energia.

Na Figura 5.18 apresentam-se as duas melhores correlações entre os valores de módulos de deformabilidade obtidos pelos diferentes ensaios in-situ, onde a correlação realizada entre o ensaio ECP e o SSG, apresenta um coeficiente de determinação,  $R^2 = 0,13$ , e a correlação apresentada entre o ensaio PORT e o DIP que apresentou um  $R^2 = 0,16$ .

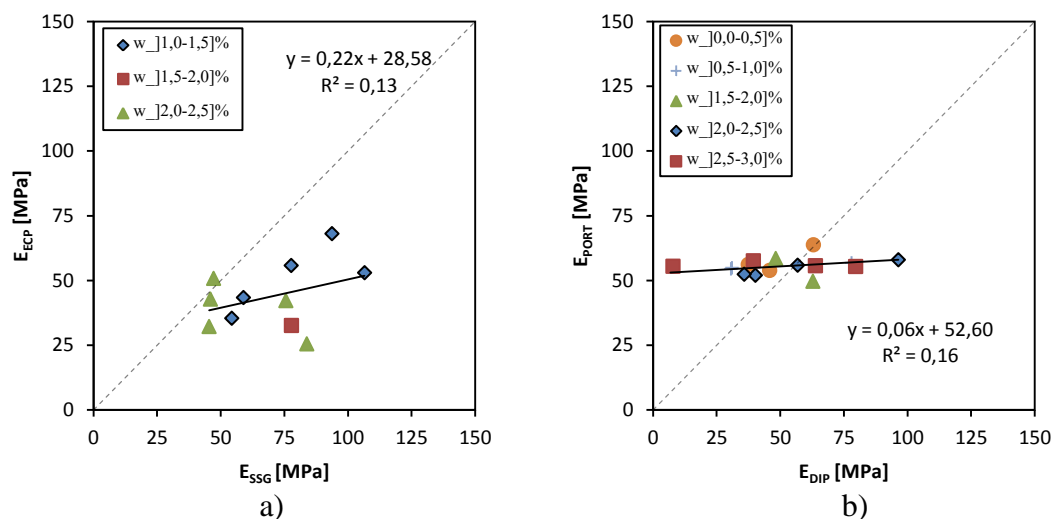


Figura 5.18 – Correlações apresentadas entre os vários ensaios in-situ para todos os níveis de energia com os dados agrupados por intervalos de teor em água: a) ECP-SSG; b) PORT-DIP.

A análise das correlações com os dados agrupados por intervalos de teor em água e apresentadas pela Figura 5.18, permitem verificar que os resultados apresentados pelo ensaio PORT não são influenciados pelo parâmetro em análise, pois são apresentados valores semelhantes de módulo de deformabilidade para todos os ensaios realizados por este equipamento. É identificada uma tendência dos resultados apresentados pelo SSG, que indica que para intervalos de teor em água superiores são obtidos valores de módulo de deformabilidade inferiores.

A análise das mesmas correlações, mas desta feita com os dados agrupados por intervalos de índice de vazios, mostram que para um mesmo intervalo de valores de índice de vazios são apresentados valores de módulos de deformabilidade que abrangem toda a gama de valores apresentados nas correlações. Logo não foi possível estabelecer uma relação entre o comportamento mecânico da camada e a variação de valores de índice de vazios. A Figura 5.19 apresenta as correlações com os dados agrupados por intervalos de índice de vazios.

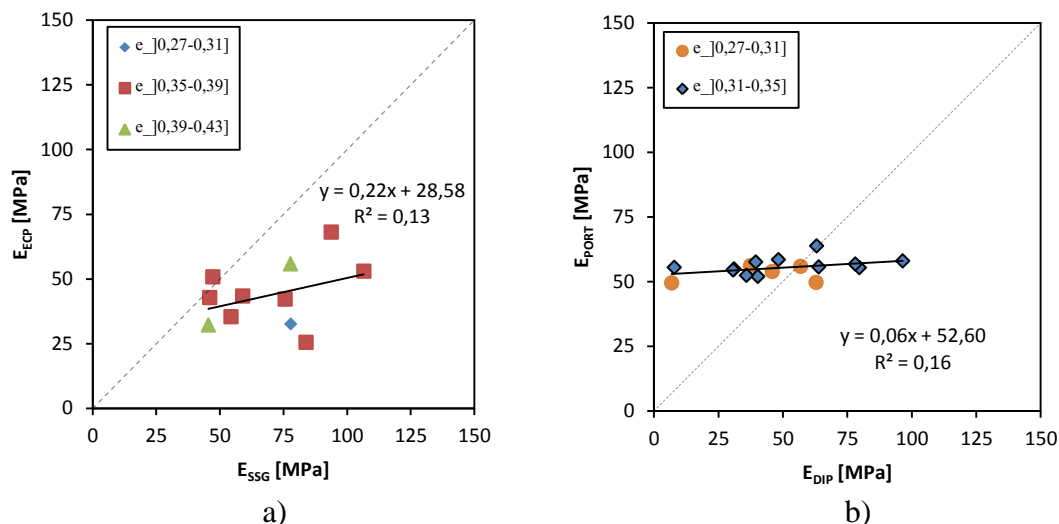


Figura 5.19 – Correlações entre os ensaios com os dados agrupados por intervalos de índice de vazios; a) ECP-SSG; b) PORT-DIP.

Do mesmo modo, as mesmas correlações mas desta feita com os dados agrupados por intervalos de grau de saturação também não permitiram identificar qualquer relação entre o grau de saturação e os resultados de módulo de deformabilidade apresentados pelos ensaios in-situ. A Figura 5.20 apresenta as correlações com os dados agrupados por intervalos de valores de grau de saturação.

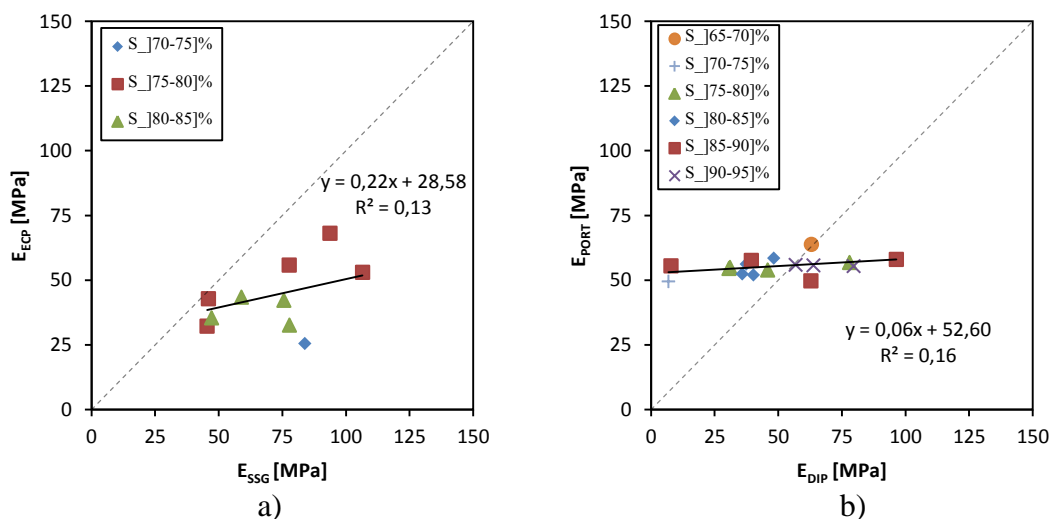


Figura 5.20 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de valores de grau de saturação; a) ECP-SSG; b) PORT-DIP.

## ii. Último nível de energia de compactação (12 Passagens)

Na Figura 5.21 apresentam-se os gráficos das duas melhores correlações entre os valores dos módulos de deformabilidade obtidos pelos diferentes ensaios in-situ para o último nível de energia de compactação, onde a correlação realizada entre o ensaio ECP e o SSG, apresenta um coeficiente de determinação,  $R^2=0,42$ , e a correlação entre o PORT e o SSG, apresentou um  $R^2=0,71$ .

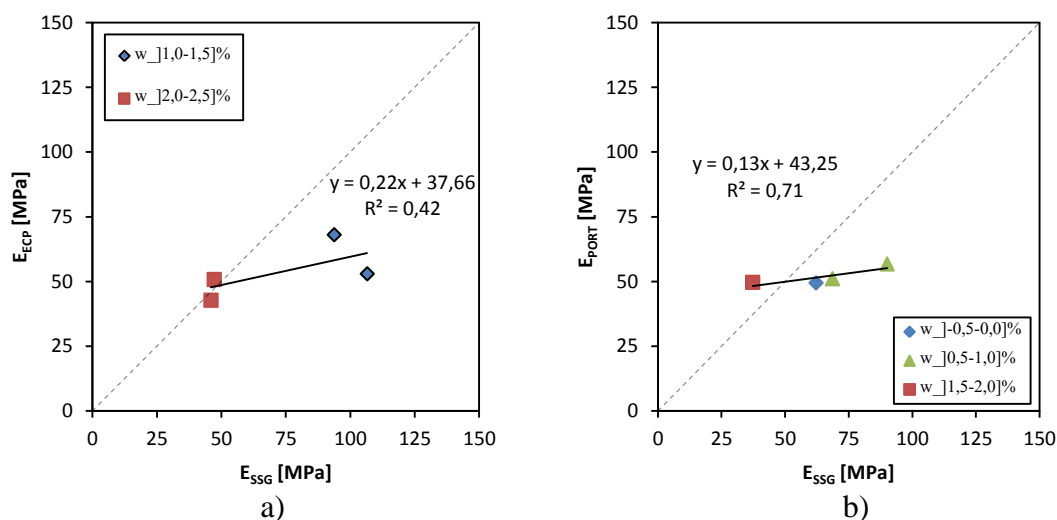


Figura 5.21 – Correlações apresentadas entre os vários ensaios in-situ para o último nível de energia de compactação (12 Passagens); a) ECP-SSG; b) PORT-SSG.

A análise da influência do teor em água não é de fácil visualização, pois apesar do gráfico da Figura 5.21a) mostrar uma tendência no sentido de se obter valores de módulos de deformabilidade inferiores quanto maior for o teor em água existente, o gráfico da Figura 5.21b) não apresenta qualquer tipo de tendência nesse sentido. Contudo apesar de apenas quatro resultados não serem suficientemente representativos da camada para o último nível de energia, a tendência apresentada pela Figura 5.21a) vai no encontro dos resultados obtidos em laboratório que foram apresentados na secção 5.1.

A análise das mesmas correlações, mas com os dados agrupados por intervalos de valores de índice de vazios e com os dados agrupados por intervalos de valores de grau de saturação, não apresentam qualquer tendência no sentido destas condições de estado influenciarem o comportamento mecânico da camada, por isto e por se considerar que

resultados apenas de quatro ensaios não serem representativos da extensão da camada de aterro, as correlações com os resultados agrupados por intervalos de valores de índice de vazios e grau de saturação não serão apresentados.

### 5.2.1.1.5 - Camada de 50 cm com valores de teores em água 2% inferiores ao ótimo.

#### i) Todos os níveis de energia de compactação

Na análise dos valores de módulo de deformabilidade referentes a camada de 50 cm de espessura com valores de teores em água 2% abaixo do ótimo (50cm\_w-2), foram apresentadas fracas correlações entre os resultados dos ensaios in-situ (ECP, DIP, SSG e PORT), para todos os níveis de energia.

Na Figura 5.22 apresentam-se as duas melhores correlações entre os valores de módulos de deformabilidade obtidos pelos diferentes ensaios in-situ, onde a correlação realizada entre o ensaio PORT e o SSG, apresenta um coeficiente de determinação,  $R^2=0,42$ , e a correlação apresentada entre o ensaio DIP e o SSG que apresentou um  $R^2=0,39$ .

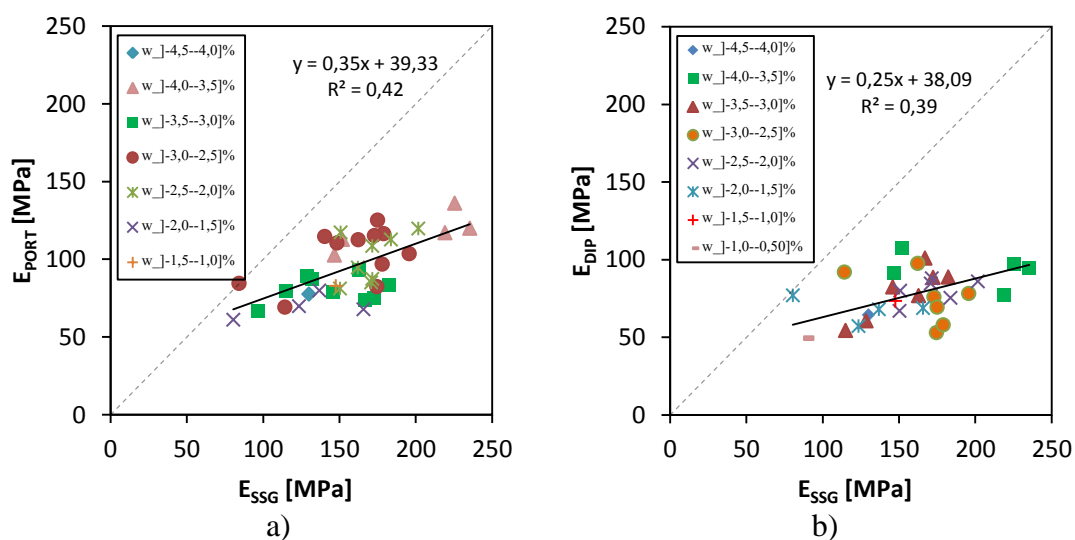


Figura 5.22 – Correlações obtidas entre os ensaios in-situ para os resultados de todos os níveis de energia: a) PORT-SSG; b) DIP-SSG.

A análise da influência do teor em água não é de fácil visualização, como é apresentado pela Figura 5.22, para um mesmo intervalo de teor em água os módulos de deformabilidade apresentados abrangem toda a gama de valores obtidos na correlação.

Logo para a camada 50cm\_w-2 não foi possível estabelecer qualquer relação entre o teor em água e os valores de módulos de deformabilidade apresentados pelos ensaios in-situ.

A análise das mesmas correlações mas com os dados agrupados por intervalos de valores de índice de vazios, é apresentada pela Figura 5.23. É verificada uma tendência no sentido de para os intervalos de índice de vazios superiores são apresentados valores de módulos de deformabilidade inferiores. No entanto esta tendência apenas é verificada para os resultados apresentados pelo SSG, o que pode ser explicado pela altura de deformação induzida no solo deste ensaio ser muito reduzida e consequentemente muito mais sensível as variações das condições de estado.

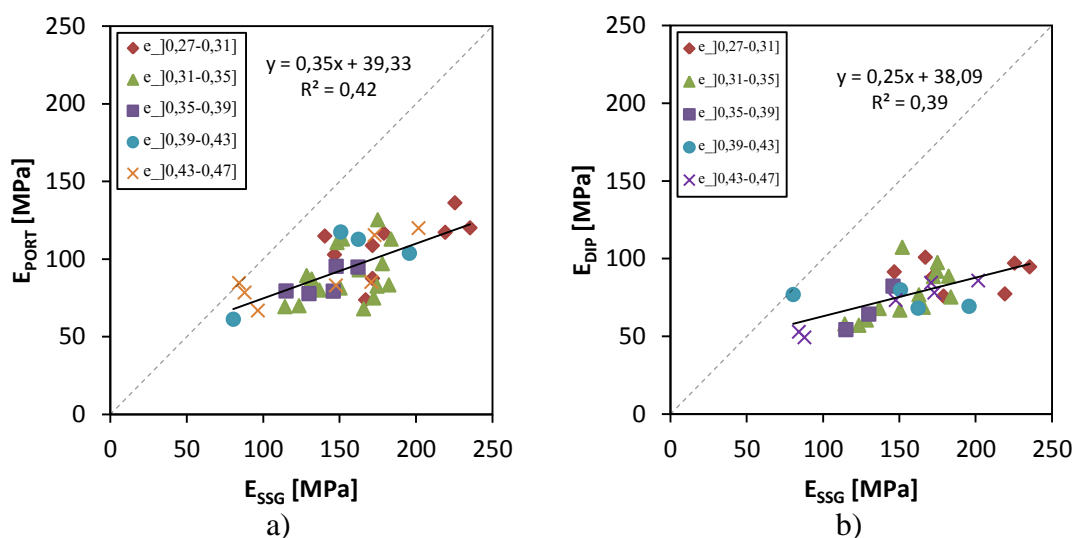


Figura 5.23 – Correlações entre os ensaios com os dados agrupados por intervalos de índices de vazios: a) PORT-SSG; b) DIP-SSG.

Por sua vez, através da análise das mesmas correlações com os dados agrupados por intervalos de grau de saturação não foi possível estabelecer nenhuma relação entre este parâmetro e os valores de módulo de deformabilidade obtidos pelos ensaios in-situ, pelo que não serão apresentadas estas correlações.

## ii) Último nível de energia de compactação (12 Passagens)

A análise das correlações obtidas através do estudo da camada de 50 cm, com um teor em água 2% inferior ao teor em água ótimo, para o último nível de energia de

compactação, permitiu apenas verificar uma boa correlação entre os resultados apresentados pelos ensaios in-situ.

Na Figura 5.24 apresentam-se os gráficos das duas melhores correlações entre os valores dos módulos de deformabilidade obtidos pelos diferentes ensaios in-situ, onde a correlação realizada entre o ensaio PORT e o DIP, apresenta um coeficiente de determinação,  $R^2=0,72$ , e a correlação entre o ensaio PORT e o SSG que apresentou um  $R^2=0,32$ .

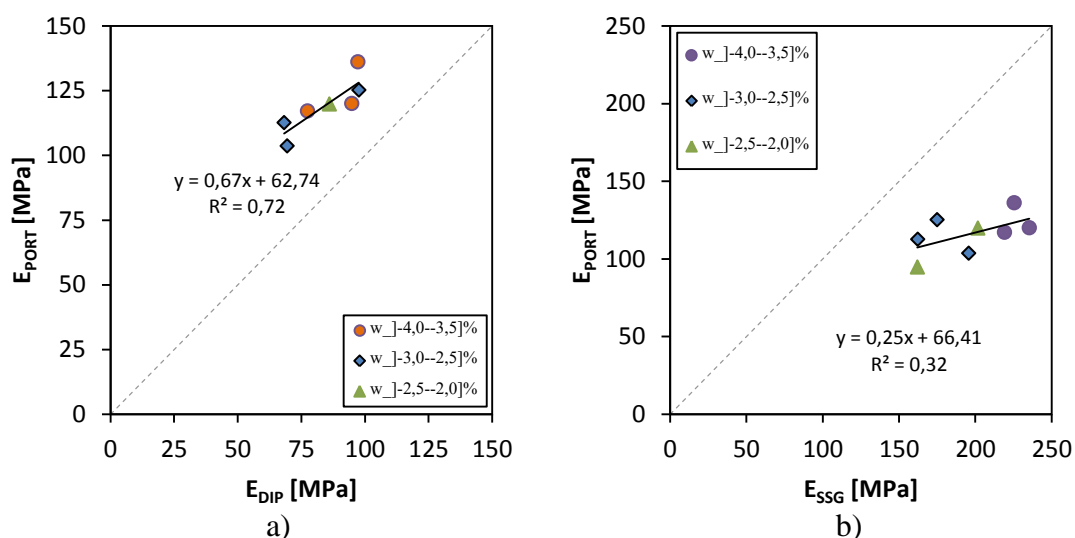


Figura 5.24 - Correlações apresentadas entre os vários ensaios in-situ para o último nível de energia (12 Passagens) com os dados agrupados por intervalos de teor em água: a) PORT-DIP; b) PORT-SSG.

A análise da influência do teor em água não é de fácil visualização, pois os resultados são apresentados de forma dispersa ao longo do gráfico, contudo na correlação entre o ensaio PORT e o SSG é identificado que os intervalos de teor em água superiores apresentam valores inferiores de módulos de deformabilidade.

A análise das mesmas correlações mas com os dados agrupados por intervalos de valores de índice de vazios, mostram uma tendência no sentido de quanto maior o índice de vazios menor é o valor de módulo de deformabilidade apresentado. A Figura 5.25 apresenta as correlações com os dados agrupados por intervalos de índice de vazios.

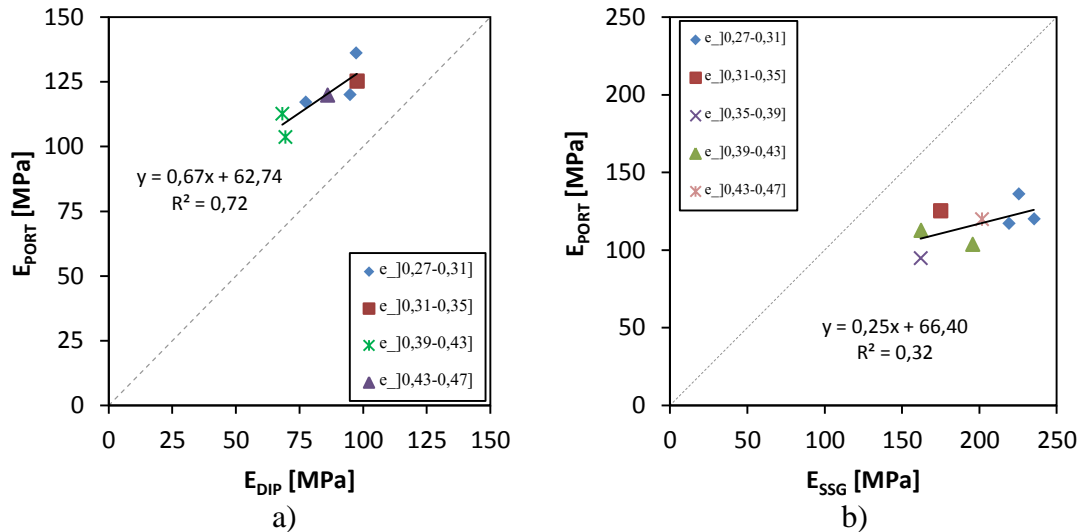


Figura 5.25 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de índice de vazios; a) PORT-DIP; b) PORT-SSG.

Por sua vez, a análise dos mesmos dados quando agrupados por intervalos de grau de saturação mostra que para apenas um grau de saturação são apresentados valores de módulos de deformabilidade que abrangem toda a gama de resultados. Logo através dos dados disponíveis, não é possível estabelecer qualquer relação entre o grau de saturação e os valores de módulo de deformabilidade obtidos nos ensaios in-situ. Na Figura 5.26 são apresentadas as correlações com os dados agrupados por intervalos de grau de saturação.

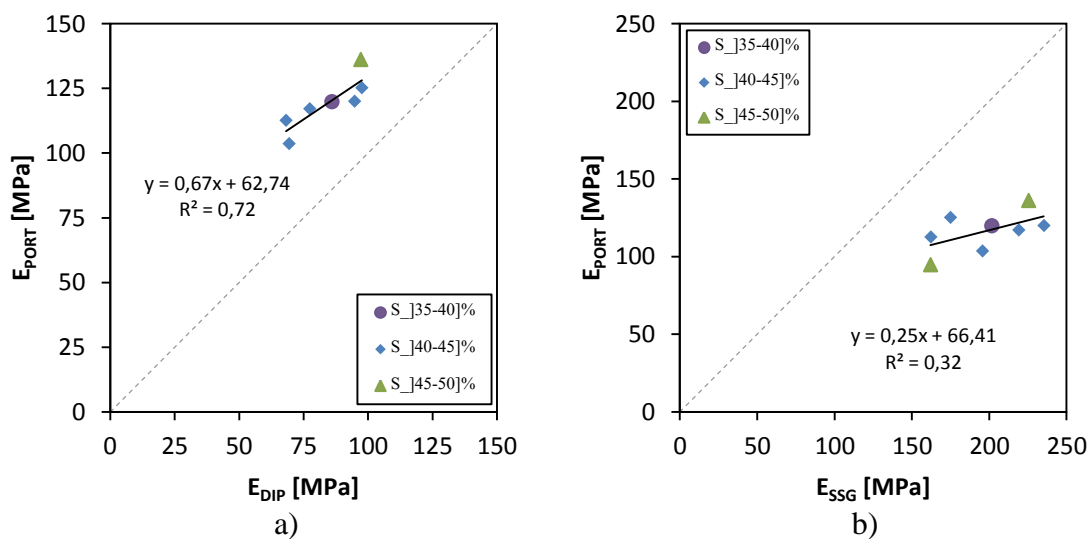


Figura 5.26 – Correlações entre ensaios com os dados agrupados por intervalos de grau de saturação; a) PORT-DIP; b) PORT-SSG.

### **5.2.1.2 - Comparação com resultados apresentados na bibliografia**

A comparação dos resultados apresentados pela análise gráfica realizada na secção anterior com os resultados apresentados por vários autores para ensaios realizados com o mesmo tipo de equipamento tem como objetivo identificar de que forma os resultados obtidos por estes ensaios são influenciados pelas condições de estado, tipo de material ou mesmo pela realização dos ensaios serem realizados em laboratório ou in-situ.

A comparação dos resultados apresentados com os resultados apresentados por Fortunato (2005) relativamente à correlação obtida através dos resultados apresentados pelos ensaios ECP e o DIP, permitiu verificar que para uma mesma gama de valores obtidos entre os dois ensaios, Fortunato (2005) apresentou um coeficiente de determinação,  $R^2 = 0,68$ , enquanto no presente trabalho a melhor correlação apresentada entre estes dois ensaios foi obtida para a camada de 30cm\_w-2 apresentando um  $R^2 = 0,42$ . Denote-se que o material utilizado por Fortunato (2005) foi areias siltosas enquanto que no presente trabalho utilizou-se o material areia argilosa, Em Fortunato (2005) utilizou-se um teor em água inferior a 9% do ótimo enquanto na camada de 30cm os teores em água foram inferiores a 6%. Logo o valor inferior de coeficiente de determinação apresentado pela melhor correlação entre os ensaios ECP e DIP pode ser explicado pelas diferenças de material utilizado e diferentes condições de estado aplicadas.

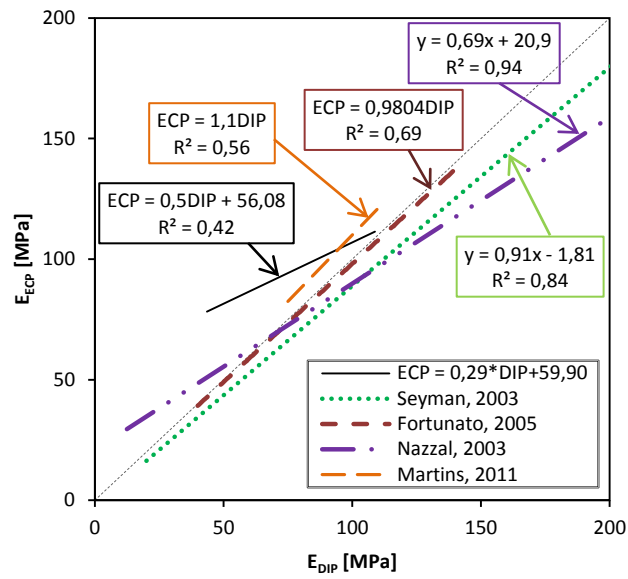
Seyman (2003), também apresentou correlações entre os ensaios ECP e o DIP, tendo obtido um coeficiente de determinação,  $R^2 = 0,84$ , no entanto é de salientar que os ensaios realizados por Seyman (2003), são ensaios realizados em laboratório, e também para gamas de valores muito superiores aos obtidos pelos ensaios no presente trabalho (40 a 500 MPa), o que poderá indiciar que os resultados apresentados pelos ensaios são mais próximos entre si para condições em que sejam obtidos valores de módulos de deformabilidade muito elevados. Seyman (2003) apresentou uma correlação entre o ensaio ECP e o SSG em que apresentou um  $R^2 = 0,69$ , que será comparada com a melhor correlação apresentada no presente trabalho entre os ensaios ECP e SSG que apresentou um coeficiente de determinação,  $R^2 = 0,26$ . No entanto os resultados apresentados por Seyman (2003) são resultados de laboratório, o que permite um maior controlo das

condições de ensaio, no entanto voltou-se a verificar que para maiores valores de módulos de deformabilidade obtidos são apresentados valores mais semelhantes entre os diferentes ensaios, justificando assim as melhores correlações apresentadas entre si.

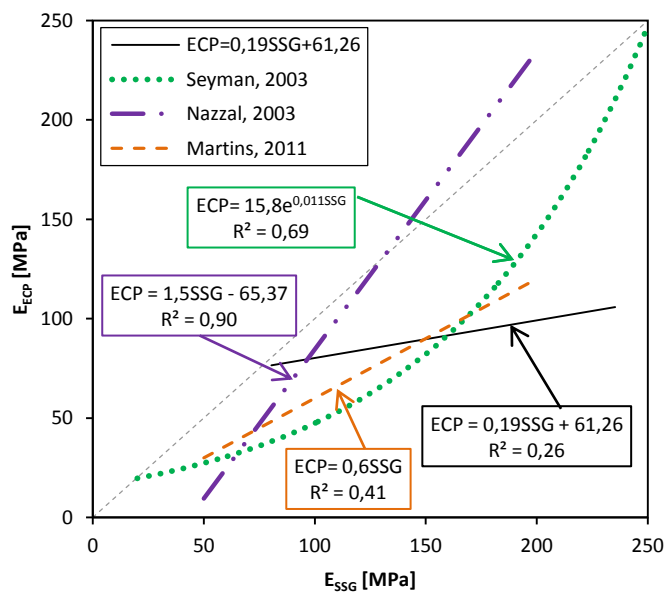
Nazzal (2003), apresentou correlações entre os ensaios ECP e DIP, com um coeficiente de determinação,  $R^2 = 0,94$ , no entanto verificou-se que a gama de resultados apresentados por Nazzal (2003) é da ordem dos (40 a 856 MPa) o que é uma gama muito superior à obtida nos resultados do presente trabalho. Comparando estes resultados apresentados por Nazzal (2003) com os resultados apresentados por Seyman (2003) e com os resultados apresentados no âmbito deste trabalho, é identificada a tendência no sentido de quanto maior é a gama de resultados apresentada melhor é a correlação apresentada entre os referidos ensaios. O mesmo acontece com os resultados apresentados por Nazzal (2003) na correlação relativa aos resultados dos ensaios ECP e SSG, que apresentou um  $R^2 = 0,9$ , logo permite apresentar a mesma conclusão que foi apresentada para a correlação realizada entre os ensaios ECP e DIP.

As correlações apresentadas por Martins (2011), também são apresentadas nos gráficos relativos as comparações dos resultados apresentados pelos diferentes autores. Apesar de no presente trabalho ter sido utilizado os dados recolhidos por Martins (2011) referentes aos ensaios in-situ, em Martins (2011) são apresentadas as correlações entre os dados dos ensaios ECP e DIP e entre o ensaio ECP e SSG apenas para as médias dos resultados obtidos dos referidos ensaios e correspondente a todos os níveis de energia de compactação. No presente trabalho serve de comparação a melhor correlação entre os referidos ensaios para os dados referentes ao último nível de energia de compactação. Contudo apesar de nas correlações apresentadas por Martins (2011) apresentarem melhores coeficientes de determinação, verifica-se uma semelhança na progressão das retas de regressão.

Na Figura 5.27 são apresentadas as correlações entre os ensaios ECP e DIP e entre os ensaios ECP e SSG, com as curvas apresentadas pelos autores mencionadas anteriormente, de forma à realização da comparação entre os vários resultados apresentados.



a)



b)

Figura 5.27 - Comparação da correlação obtida através dos resultados dos ensaios in-situ com as correlações apresentadas por vários autores; a) ECP e DIP; b) ECP-SSG.

### 5.2.1.3 - Análise Espacial

A análise espacial baseou-se essencialmente sobre os dados referentes ao nível de energia equivalente às 12 passagens do cilindro na compactação, pois foram os dados que apresentaram melhores resultados na análise gráfica, mas devido ao reduzido número de dados não permitiram apresentar conclusões. Sendo assim a análise espacial foi baseada num método de interpolação que permitiu através dos dados recolhidos em campo por interpolação prever qual seria o seu comportamento ao longo de toda a camada. Esta análise foi realizada com recurso ao software ArcGis da ESRI. Como foi referido no Capítulo 4, o método de interpolação utilizado na maioria das análises foi o Inverse Distance Weight (IDW). Deste modo a superfície de interpolação é uma média ponderada de todos os pontos da amostragem em que o peso de cada amostra diminui a medida que a distância do ponto de interpolação em relação ao ponto da amostragem aumenta (Aguiar, 2010).

#### 5.2.1.3.1 - Análise para a camada de 30 cm com os valores de teor em água 2% inferiores ao ótimo (30cm\_w-2).

Na análise espacial foram gerados mapas para os resultados obtidos em todos os ensaios in-situ (ECP, SSG, DIP e PORT), e mapas descritivos das condições de estado de cada camada das quais se pretende avaliar a influência no comportamento mecânico. Os mapas gerados correspondentes às condições de estado foram: mapas de teores em água, índice de vazios e grau de saturação. A Figura 5.28 mostra os mapas obtidos através de interpolação para os referidos parâmetros após a aplicação do nível de energia equivalente às 12 passagens do cilindro na compactação.

O mapa da Figura 5.28a) demonstra que grande parte superfície ensaiada é homogénea em relação ao teor em água existente. No entanto são visíveis várias áreas em que foram obtidos teores em água superiores na ordem dos 0,5 % e outras que apresentam teores em água inferiores na ordem de 1 % em relação ao teor em água que é apresentado na maior zona de homogeneidade na camada.

De acordo com os resultados demonstrados pelo mapa da Figura 5.28b), apresenta grandes manchas em que a camada contém os mesmos intervalos de índice de vazios. Porém, a camada não pode ser considerada homogénea. Verifica-se ainda que as zonas

correspondentes a valores de índice de vazios mais baixos estão associadas às zonas com valores de teores em água mais elevados. Este facto está de acordo com o expectável uma vez que os valores de teor em água mais elevados aproximam-se do valor do teor em água ótimo obtido no ensaio de compactação.

O mapa apresentado na Figura 5.28c) mostra que a camada em análise não é homogénea no que se refere aos resultados de grau de saturação. Como se pode observar existem variações de intervalos de grau de saturação que vão desde os 34% aos 58%, o que revela grande heterogeneidade da camada, pelo que, tendo em conta a maior variação da sucção para este intervalo de valores verificada através dos ensaios de laboratório, seria de esperar também grande heterogeneidade quanto ao comportamento mecânico.

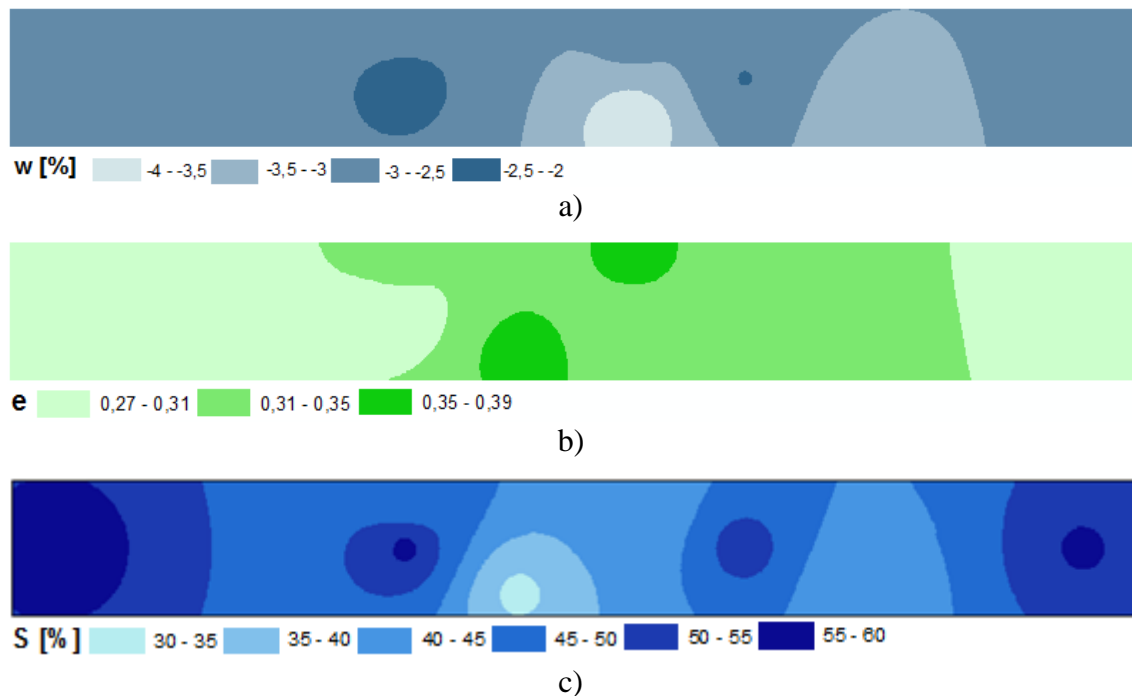


Figura 5.28 – Mapa referente aos dados de: a) teor em água; b) índice de vazios; c) grau de saturação, para o nível de energia equivalente as 12 passagens do cilindro na compactação.

As relações entre os parâmetros de estado presentes nos mapas da Figura 5.28 são de fácil visualização. Denota-se que apesar de não serem totalmente equivalentes, o mapa relativo ao grau de saturação demonstra este parâmetro evolui da mesma forma que o mapa relativo aos teores em água, no sentido de que quanto maior é o teor em água maior é o grau de saturação. Por outro lado, verifica-se que nas zonas onde são

apresentados maiores valores de grau de saturação e teor em água, são apresentados menores valores de índice de vazios, o que está de acordo com o expectável.

No que diz respeito aos resultados dos ensaios in-situ, a mesma apresentação foi adotada. Pretende-se deste modo comparar os mapas obtidos para cada um dos ensaios individualmente e com os mapas obtidos para as condições de estado de forma a verificar a existência de alguma influência das condições de estado no comportamento mecânico da camada de aterro em análise.

O mapa da Figura 5.29 apresenta a interpolação para a camada realizada através dos resultados obtidos pelo ensaio ECP, DIP, SSG e Portancêmetro no nível de energia correspondente as 12 passagens.

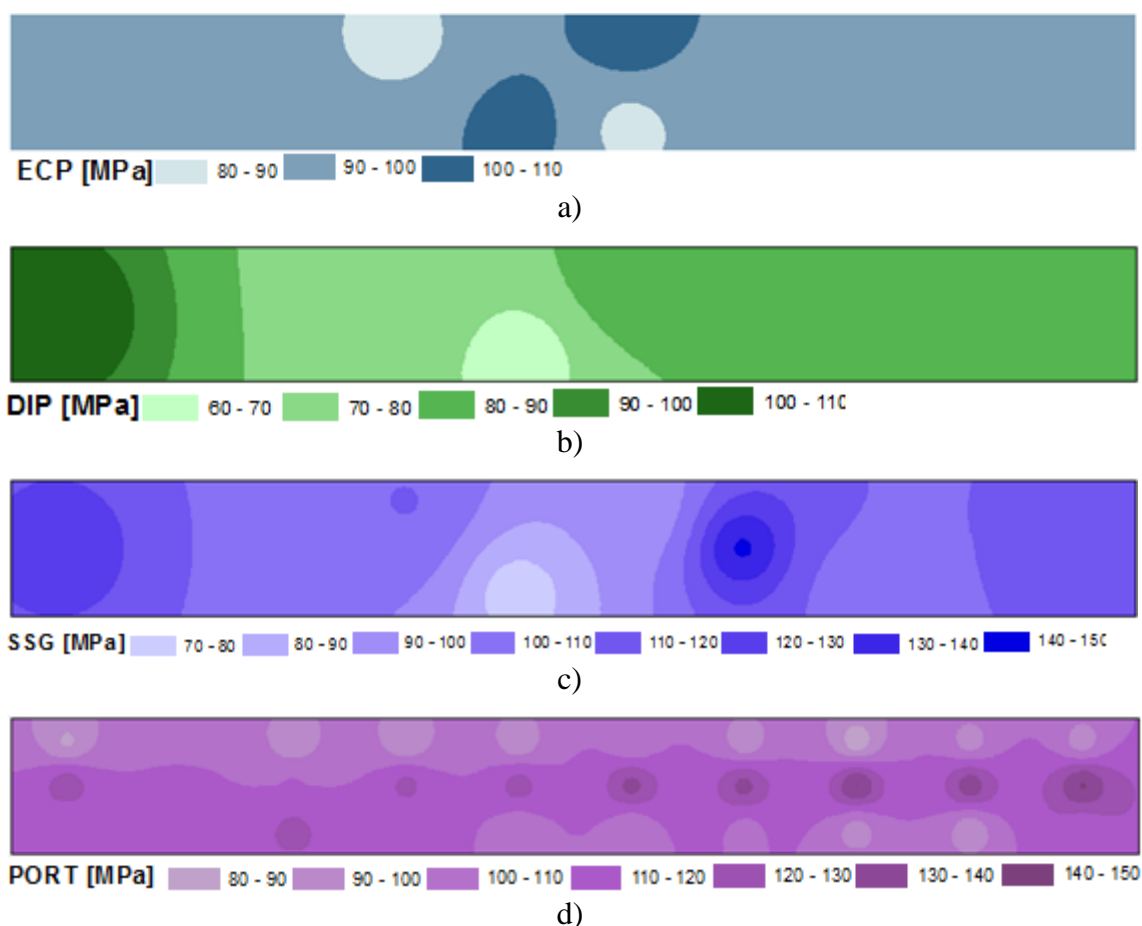


Figura 5.29 – Mapas referentes aos dados obtidos através dos ensaios: a) ECP; b) DIP; c) SSG; d) PORT, para o nível de energia equivalente as 12 passagens do cilindro na compactação.

O mapa da Figura 5.29a) apresenta uma grande homogeneidade da camada para os resultados obtidos através do referido ensaio. Na análise do mapa da Figura 5.29b) é verificada que a superfície é homogénea em cerca de metade da sua dimensão, embora se verifique uma acentuada variação do módulo de deformabilidade na outra metade. Como pode ser observado através da Figura 5.29c), os resultados referentes ao ensaio SSG não apresenta homogeneidade da camada de aterro em análise. O mapa da Figura 5.29d) demonstra que os resultados obtidos pelo ensaio PORT identificam grande parte da superfície do aterro como homogénea.

Pelos mapas apresentados na Figura 5.29 foi identificada uma relação entre os resultados apresentados pelo ensaio DIP e SSG, onde se verifica uma concordância em cerca de metade da superfície ensaiada. O mesmo foi verificado na análise gráfica, pois foi entre os resultados dos respetivos ensaios que foi apresentado o melhor coeficiente de determinação,  $R^2 = 0,55$ .

A sobreposição dos mapas relativos aos módulos de deformabilidade com os mapas referentes às condições de estado permitem observar algumas relações. Por exemplo, relativamente ao mapa da Figura 5.29a) verifica-se a existência de uma zona no mapa que se destaca, pois são apresentados resultados para o módulo de deformabilidade superiores. Quando realizada a comparação com os mapas referentes às condições de estado, mais propriamente com o mapa referente aos dados do índice de vazios (Figura 5.28b)) verificou-se que à zona com os valores mais elevados de módulos de deformabilidade corresponde a zona com os maiores valores de índice de vazios, como pode ser observado na Figura 5.30. Esta relação não é consistente com os resultados apresentados pelos ensaios de laboratório, pois estes indicam que para um mesmo valor de grau de saturação quanto menor for o índice de vazios maior será a sucção apresentada pelo solo e consequentemente o módulo de deformabilidade será maior.

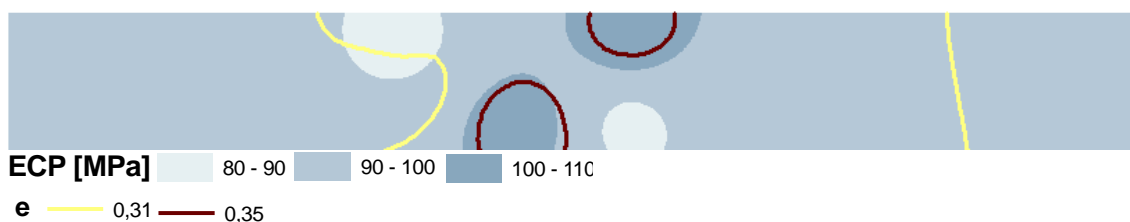


Figura 5.30 – Sobreposição de um mapa de Iso-linhas referente aos dados do índice de vazios sobre o mapa referente aos resultados obtidos através do ensaio ECP para o último nível de energia de compactação (12 passagens).

A comparação realizada entre o mapa referente aos dados do ensaio SSG (Figura 5.29c)) e os mapas apresentados na Figura 5.28, referentes às condições de estado permitiram verificar que quanto maior são os valores de teores em água e de grau de saturação maiores são os módulos de deformabilidade, como atesta a Figura 5.31.

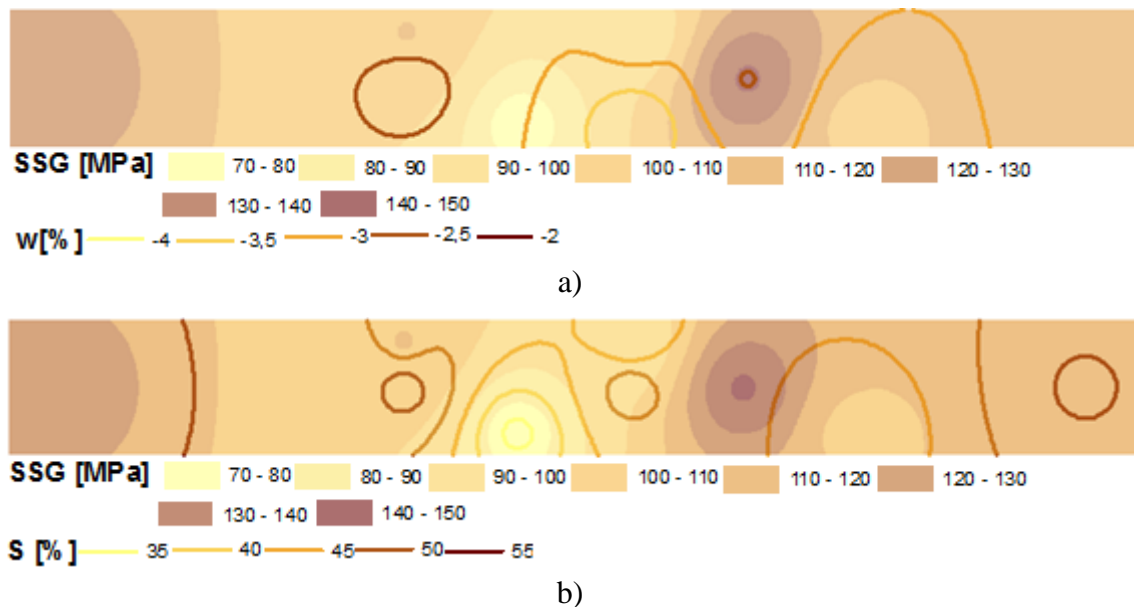


Figura 5.31 – Sobreposição de mapas de Iso-linhas referente aos valores dos: a) teores em água; b) graus de saturação; sobre o mapa representativo dos resultados apresentados pelo ensaio SSG, para o último nível de energia de compactação.

Apesar de terem sido apenas apresentados os mapas que demonstram as melhores relações que foram enunciadas, verifica-se que as relações apresentadas pelo ensaio ECP são diferentes e opostas às relações apresentadas pelos ensaios SSG e DIP. Enquanto que os valores de módulo de deformabilidade obtidos através do ensaio ECP são maiores para as zonas correspondentes a maiores valores de índice de vazios e menores valores de grau de saturação e teor em água, para os ensaios SSG e DIP verificam-se as relações opostas.

É de salientar que as relações apresentadas pelos dados do ensaio ECP são consistentes com os resultados obtidos através dos ensaios de laboratório. Deste modo, para a camada de 30 cm os resultados apresentados nos mapas referentes ao SSG e ao DIP não estão em concordância com os resultados apresentados em laboratório.

As comparações entre os resultados do ensaio Portancèmetre com os mapas correspondentes aos valores das condições de estado não permitiram chegar a qualquer

conclusão sobre a influência destas no comportamento mecânico da camada de aterro pelo que não é apresentado.

### 5.2.1.3.2 - Análise para a camada de 40 cm com os valores de teor em água 2% inferiores ao ótimo (40cm\_w-2).

A análise espacial para a camada de 40 cm de espessura com os teores em água 2% inferiores ao ótimo é em tudo semelhante à análise realizada para a camada de 30cm. Deste modo, na Figura 5.32 são apresentados os mapas obtidos através de interpolação para os parâmetros de estado (teor em água, índice de vazios, grau de saturação) após a aplicação do último nível de energia de compactação (12 passagens).

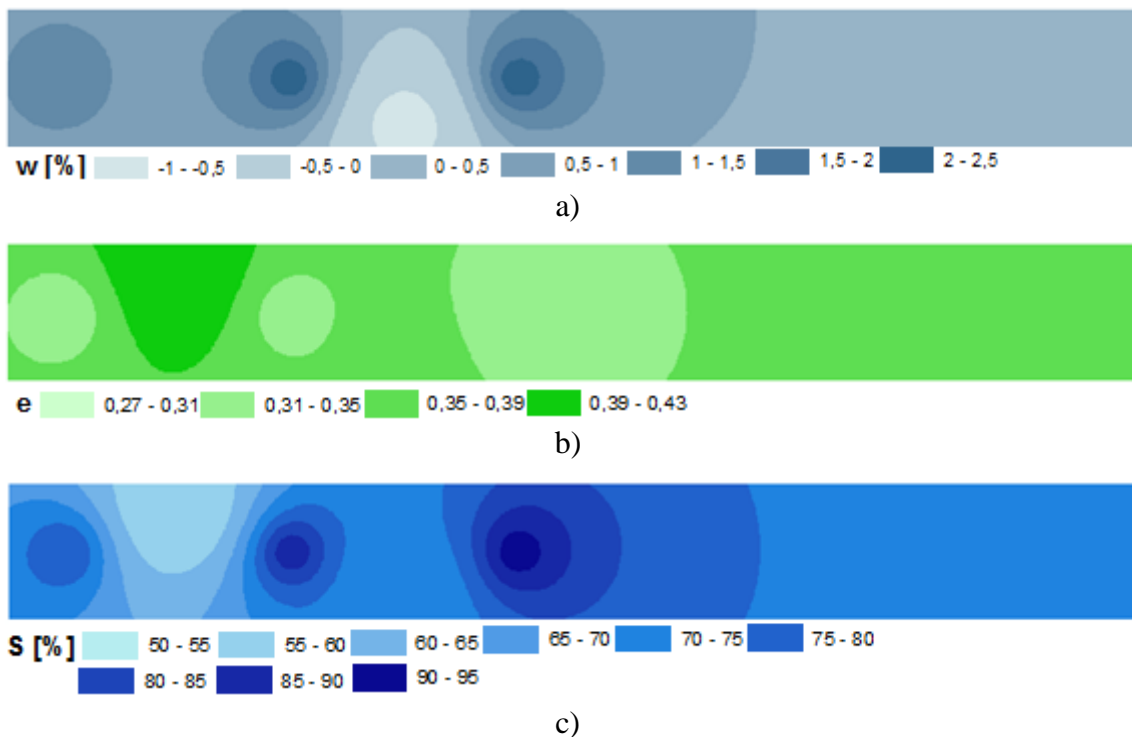


Figura 5.32 – Mapa referente aos dados de: a) teor em água; b) índice de vazios; c) grau de saturação, para o nível de energia correspondente as 12 passagens do cilindro na compactação.

O mapa da Figura 5.32a) demonstra homogeneidade em grande parte da camada, no que diz respeito aos valores de teor em água. No entanto são visíveis várias manchas onde são apresentados valores de teor em água 1% superior e zonas onde são apresentados teores em água 1% inferior ao teor em água apresentado na maioria da extensão da

camada. As Figuras 5.32b) e c) apresentam a distribuição do índice de vazios e do grau de saturação ao longo da camada. São apresentadas várias manchas que indicam variações ao longo de toda a camada. Denota-se que os mapas são semelhantes, no entanto as zonas em que são apresentados valores de índice de vazios inferiores são as mesmas zonas onde são apresentados os superiores valores de grau de saturação.

No que diz respeito aos resultados dos ensaios in-situ a mesma apresentação foi adotada. Pretende-se deste modo comparar os mapas obtidos para cada um dos ensaios com os mapas obtidos para as condições de estado (Figura 5.32) de forma a verificar a existência de relações entre as condições de estado e o comportamento mecânico da camada de aterro em análise.

Os mapas apresentados na Figura 5.33 apresentam a interpolação para a camada realizada através dos resultados obtidos pelos ensaios: ECP, SSG e Portancêmetro, relativamente os dados apresentados para o último nível de energia de compactação.

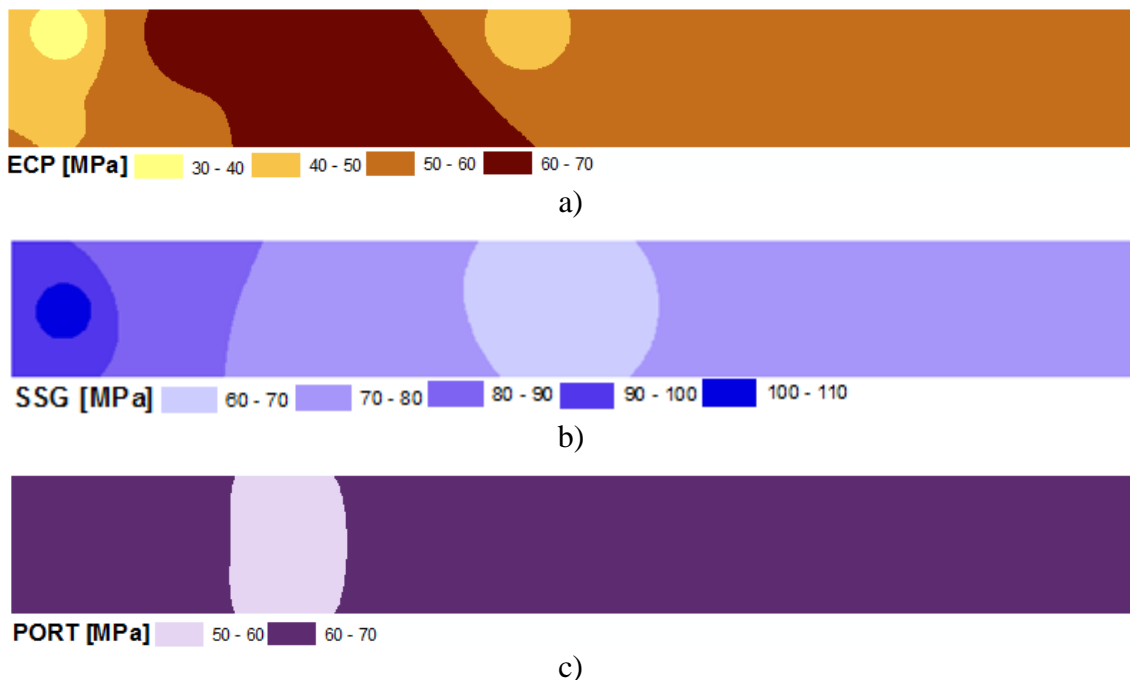


Figura 5.33 – Mapas representativos dos resultados obtidos pelos ensaios; a) ECP; b) SSG; c) PORT, para o último nível de energia de compactação (12 passagens)

O mapa da Figura 5.33a) apresenta homogeneidade em cerca de metade da camada para os resultados obtidos através do ensaio ECP. Na análise do mapa da Figura 5.33b) é verificada que a superfície é homogênea em cerca de três quartos da extensão da camada, no entanto é apresentado no lado esquerdo uma variação acentuada dos valores

de módulos de deformabilidade apresentados pelo SSG. O mapa da Figura 5.33c) apresenta que os resultados obtidos pelo ensaio Portancêmetro são distribuídos de forma homogênea em praticamente toda a camada de aterro.

A sobreposição dos mapas relativos aos módulos de deformabilidade com os mapas referentes às condições de estado não permitiu verificar qualquer relação entre estes, tal como na análise gráfica, onde não foi possível identificar qualquer influência das condições de estado nos resultados de módulos de deformabilidade apresentados pelos ensaios in-situ.

#### **5.2.1.3.3 - Análise para a camada de 40 cm com os valores de teor em água equivalentes ao ótimo (40cm\_wo).**

A análise espacial realizada para a camada de 40 cm de espessura, para valores de teores em água próximos dos ótimos (40cm\_wo), foi realizada de forma análoga as camadas de aterro analisadas anteriormente.

Na análise da Figura 5.34 é verificada uma heterogeneidade da camada para as três condições de estado distintas. No entanto são identificadas algumas relações entre elas. A Figura 5.34a) quando comparada com a Figura 5.34c), mostra que em zonas específicas as condições de estado evoluem da mesma forma, o que seria de esperar uma vez que o grau de saturação varia diretamente com o teor em água. A relação apresentada entre o mapa da Figura 5.34b) com o mapa da Figura 5.34c), é mais evidente, uma vez que em praticamente toda a extensão do mapa, os locais onde são apresentados índices de vazios inferiores, são os mesmos locais onde são apresentados os valores de grau de saturação superiores.

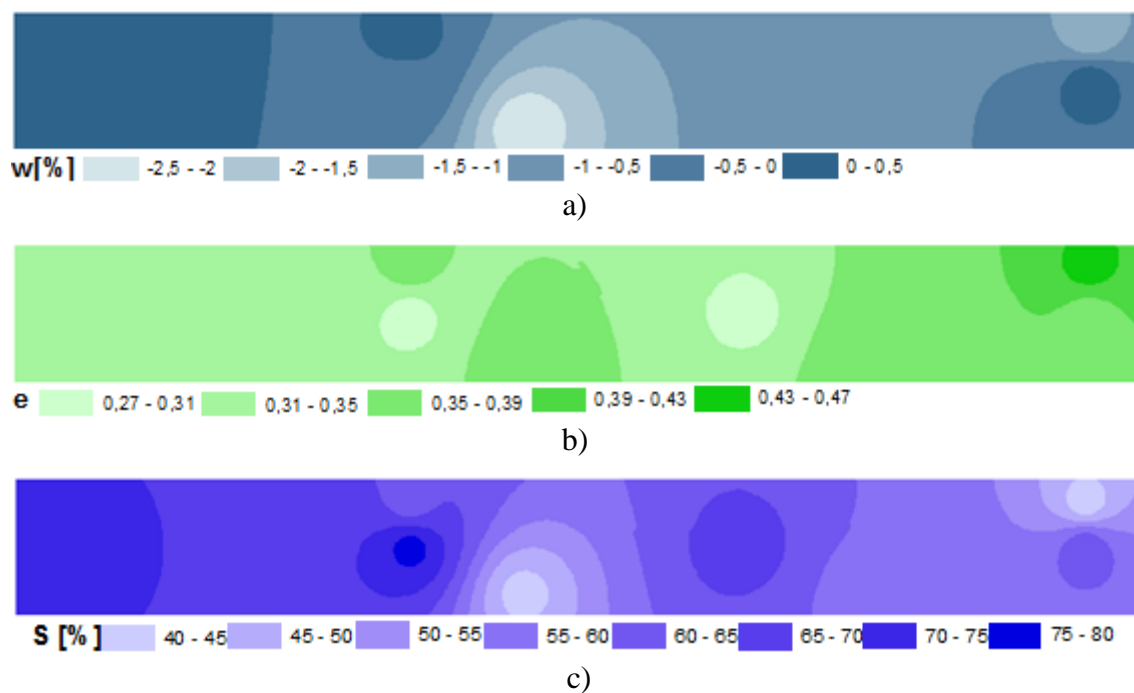


Figura 5.34 – Mapa referente aos dados de; a) teor em água; b) índice de vazios; c) grau de saturação, para o último nível de energia de compactação (12 passagens).

No que diz respeito aos resultados dos ensaios in-situ, a mesma apresentação foi adotada. Pretende-se deste modo comparar os mapas obtidos para cada um dos ensaios in-situ com os mapas obtidos para as condições de estado (Figura 5.34), de forma a identificar a existência de alguma relação entre as condições de estado e o comportamento mecânico da camada de aterro em análise.

Os mapas da Figura 5.35 apresentam os mapas das interpolações dos resultados obtidos pelos ensaios in-situ (ECP, DIP, SSG, PORT), no último nível de energia de compactação (12 passagens).

O mapas das Figuras 5.35a) e b) apresentam várias zonas ao longo da camada em quem são obtidos valores de módulos de deformabilidade muito distintos, pelo que a camada não é homogénea. Contudo a zona onde são apresentados os maiores valores pelo ensaio DIP, também são as zonas onde são apresentados os maiores valores de módulo de deformabilidade pelo ensaio ECP. O mapa da Figura 5.35c), que apresenta os resultados obtidos pelo ensaio SSG mostra grande homogeneidade de resultados ao longo da camada, contudo existe uma mancha no lado direito da camada em que os módulos de deformabilidade apresentados são superiores aos apresentados na restante

extensão da camada. O mapa da Figura 5.35d) mostra que ao longo de toda a camada são apresentados valores de módulo de deformabilidade diferentes, o que traduz numa heterogeneidade de resultados apresentados pelo ensaio PORT para a camada de aterro em análise.

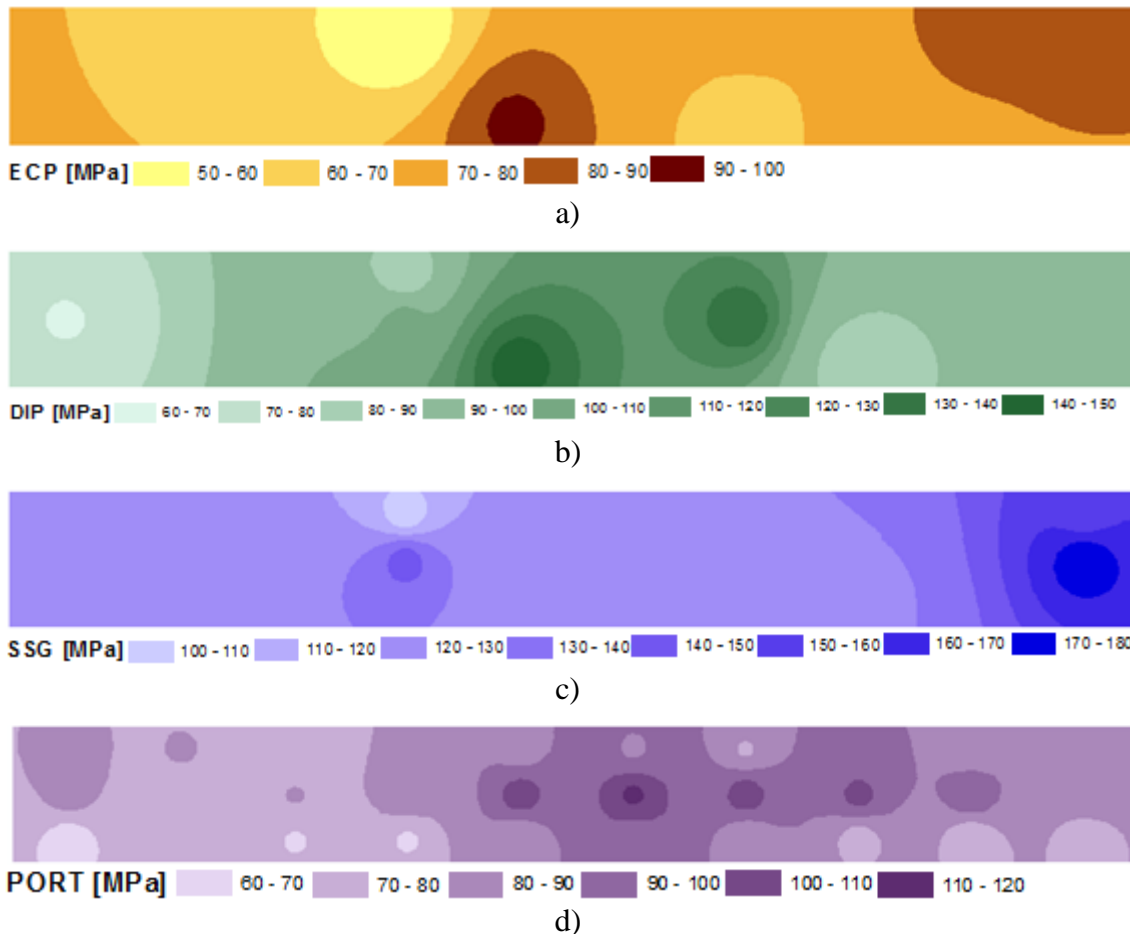


Figura 5.35 – Mapa referente aos dados apresentados pelo ensaio; a) ECP; b) DIP; c) SSG; d) PORT, para o nível de energia equivalente as 12 passagens do cilindro na compactação.

A semelhança identificada entre o mapa dos resultados relativos ao ensaio ECP (Figura 5.35a)) com os apresentados pelo mapa dos resultados do DIP (Figura 5.35b)), também foi verificada na análise gráfica, onde a correlação realizada entre os dois ensaios apresentou em coeficiente de determinação,  $R^2=0,82$ . No entanto esta correlação não foi apresentada na secção relativa a análise gráfica devido ao reduzido número de dados existentes na correlação entre os dois ensaios.

Na sobreposição dos mapas referentes às condições de estado sobre os mapas referentes aos resultados dos ensaios in-situ foram identificadas algumas relações entre os dados dos ensaios ECP e DIP com as condições de estado.

Por exemplo, a sobreposição do mapa do teor em água sobre o mapa referente aos dados de ECP apresenta uma tendência indicando que os valores dos módulos apresentados por este ensaio aumentam com a diminuição dos valores de teor em água. A mesma tendência é identificada quando é sobreposto o mapa do teor em água sobre o mapa de dados do ensaio DIP. Denota-se ainda que a tendência apresentada é concordante com os resultados obtidos em laboratório, onde é indicado que para valores de grau de saturação superiores são apresentados valores de sucção inferiores. Os mapas das sobreposições referidas são apresentados na Figura 5.36.

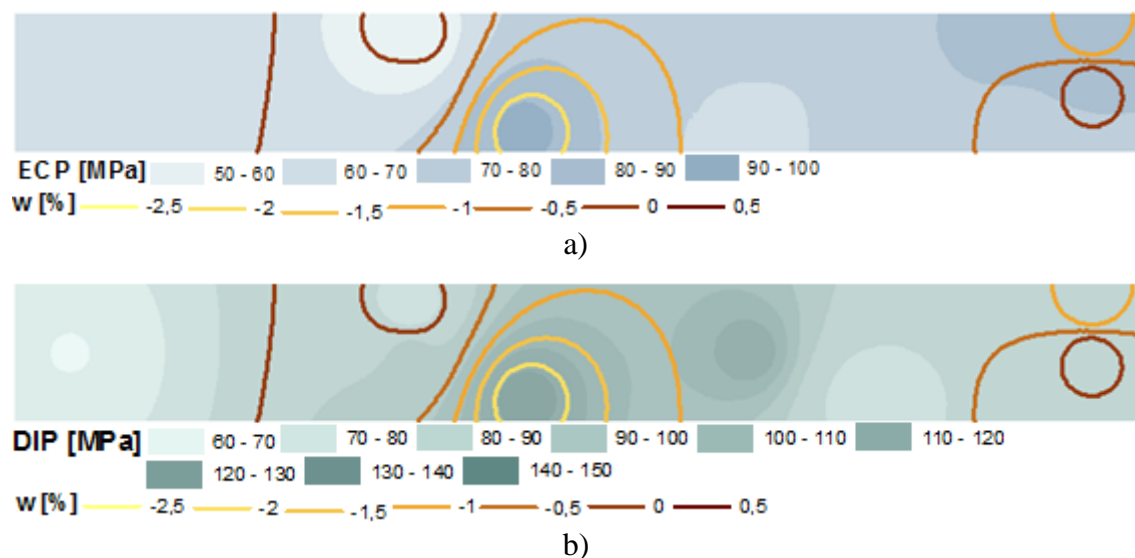


Figura 5.36 – Sobreposição do mapa de iso-linhas referente aos dados de teor em água sobre os mapas relativos aos dados dos ensaios in-situ: a) ECP; b) DIP, para os dados referentes ao último nível de energia de compactação.

#### 5.2.1.3.4 - Análise para a camada de 40 cm com os valores de teor em água 2% superiores ao ótimo (40cm\_w+2).

Para a análise espacial desta camada, foram gerados mapas representativos dos resultados apresentados pelos ensaios in-situ (ECP, DIP, SSG e PORT), e mapas descritivos das condições de estado da camada das quais se pretende avaliar a influência no comportamento mecânico. Os mapas gerados correspondentes as condições de estado foram: mapas de teores em água, índice de vazios e grau de saturação. A Figura

5.37 mostra os mapas obtidos através de interpolação para os referidos parâmetros após a aplicação do último nível de energia de compactação (12 passagens).

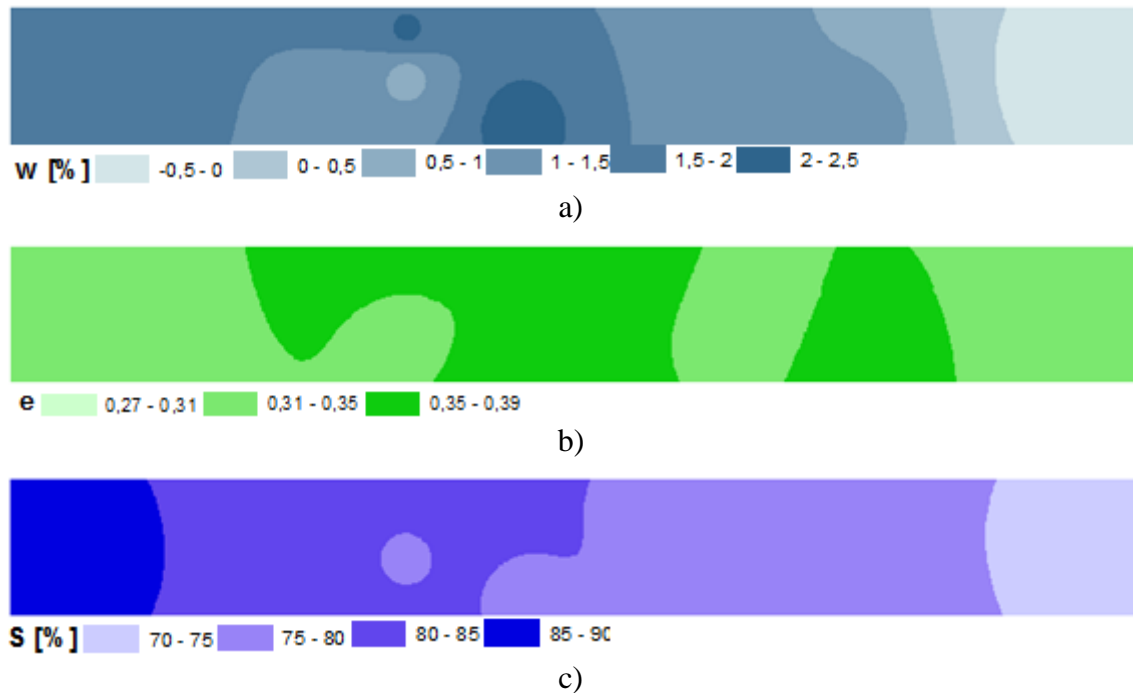


Figura 5.37 – Mapa referente aos dados de: a) teor em água; b) índice de vazios; c) grau de saturação para o último nível de energia de compactação (12 passagens).

O mapa da Figura 5.37a) demonstra várias manchas que identificam diferentes valores de teor em água, o que significa que a camada em análise relativamente aos valores de teor em água não apresenta homogeneidade, apesar de existirem várias zonas onde são homogêneas. De acordo com os resultados apresentados na Figura 5.37b), o índice de vazios apresenta uma grande área de resultados homogêneos, no entanto são apresentadas várias manchas pontuais que fazem o índice vazios variar dentro da camada entre 0,30 e 0,38. O mapa apresentado na Figura 5.37c) mostra que a camada em análise não é homogênea no que se refere aos resultados do grau de saturação. Como se pode observar existem variações de intervalos de grau de saturação que vão desde os 70% aos 90%, o que revela grande heterogeneidade.

No que diz respeito aos resultados dos ensaios in-situ, a mesma apresentação foi adotada. Pretende-se deste modo comparar os mapas obtidos para cada um dos ensaios individualmente com os mapas obtidos para as condições de estado no comportamento mecânico da camada de aterro em análise.

O mapa da Figura 5.38 apresenta a interpolação para a camada realizada através dos resultados obtidos pelo ensaio ECP, SSG e Portancêmetro no nível de energia correspondente as 12 passagens na compactação.

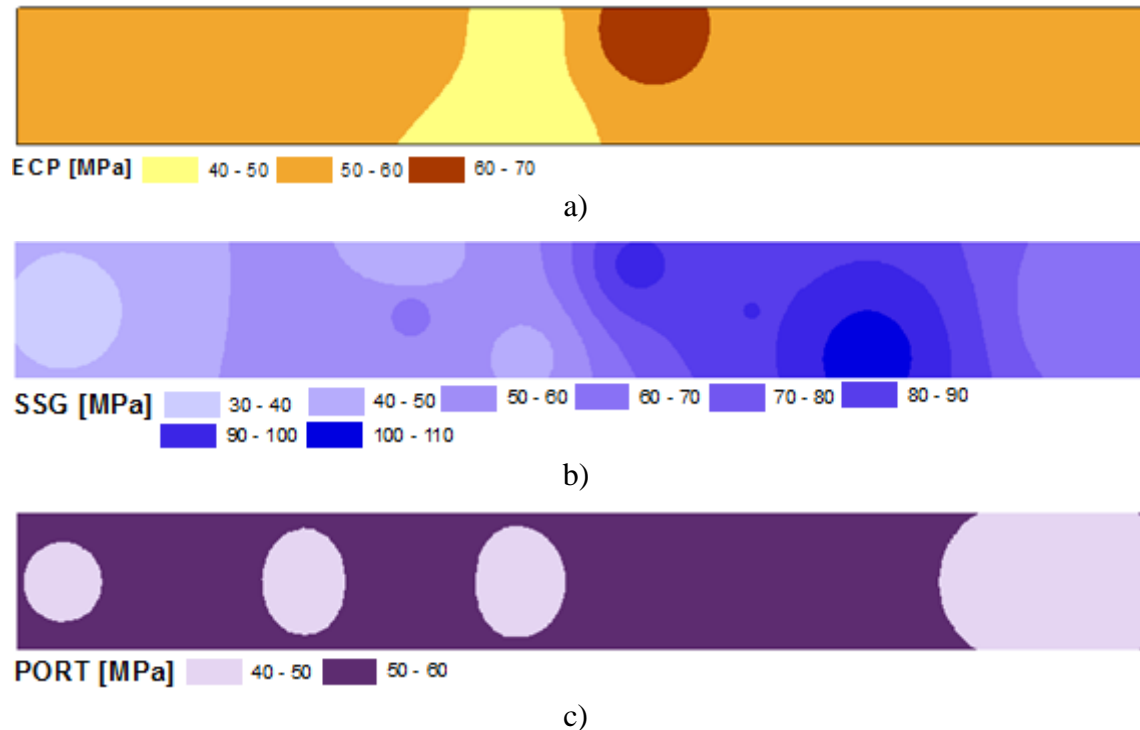


Figura 5.38 – Mapa referente aos dados obtidos através do ensaio; a) ECP; b) SSG; c) PORT para o último nível de energia de compactação (12 passagens).

O mapa da Figura 5.38a) apresenta uma grande homogeneidade da camada para os resultados obtidos através do referido ensaio. Na análise do mapa da Figura 5.38b) é verificado que a superfície apresenta grandes variações de módulo de deformabilidade, são apresentados valores entre 30 e 110 MPa, o que revela grande heterogeneidade de resultados ao longo de toda a camada. O mapa da Figura 5.38c) apresenta que os resultados obtidos pelo ensaio PORT identificam grande parte da superfície do aterro como homogênea. Contudo existem zonas em que são apresentados valores de módulos de deformabilidade superiores e zonas onde são apresentados valores menores.

Os resultados apresentados pelo mapa da Figura 5.38 quando comparados com os resultados dos mapas representativos das condições de estado não permitiram identificar qualquer relação no sentido destas apresentarem alguma influência nos valores dos módulos de deformabilidade obtidos nos ensaios in-situ.

### 5.2.1.3.5 - Análise para a camada de 50 cm com os valores de teor em água 2% inferiores ao ótimo (50cm\_w-2).

A análise espacial para os resultados obtidos na camada de 50 cm de espessura foi realizada de forma análoga a realizada para as camadas anteriormente apresentadas, sendo apresentados os mapas representativos dos dados referentes as condições de estado e os mapas correspondentes aos resultados apresentados pelos diferentes ensaios in-situ.

A Figura 5.39 mostra os mapas obtidos através de interpolação dos resultados apresentados pelos parâmetros de estado: teor em água, índice de vazios, e grau de saturação.

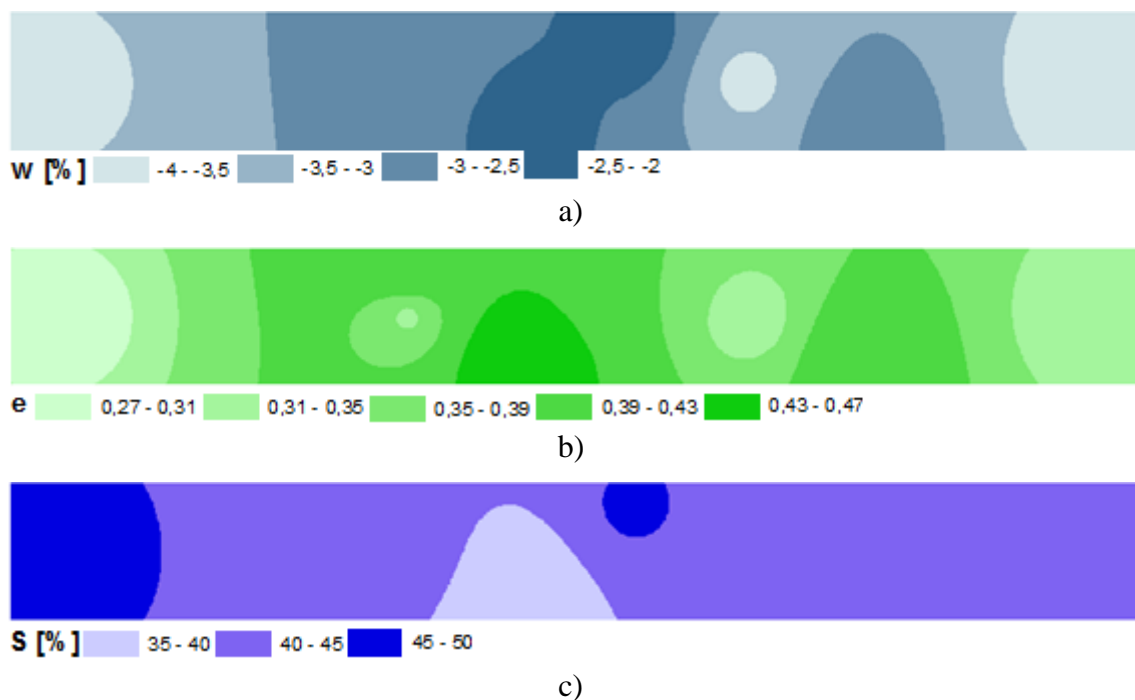


Figura 5.39 – Mapas referentes aos dados de: a) teor em água; b) Índice de vazios; c) grau de saturação, para o nível de energia equivalente as 12 passagens do cilindro na compactação.

O mapa apresentado pela Figura 5.39a) demonstra várias zonas em que o teor em água apresentado é homogêneo, no entanto são verificadas alterações do teor em água na ordem dos 2 %. O mapa da Figura 5.39b) referente aos dados de índice de vazios apresenta grande heterogeneidade de resultados ao longo da camada de aterro, apresentando variações de índice de vazios na ordem dos 0,2. No entanto o mapa

referente aos resultados de grau de saturação apresentado na Figura 5.39c) apresenta uma grande mancha onde é verificada a homogeneidade nos valores de grau de saturação.

Entre os mapas representados pela Figura 5.39 foram identificadas algumas relações, como por exemplo, onde são apresentados valores mais elevados de teor em água são as zonas onde são apresentados os valores mais elevados de índice de vazios e vice-versa. A relação entre o mapa referente aos dados de grau de saturação não é tão precisa, no entanto existem pelo menos duas zonas em que são apresentados os valores inferiores do índice de vazios correspondem às zonas onde são apresentados aos valores de grau de saturação superiores.

No que diz respeito aos resultados dos ensaios in-situ, a mesma apresentação foi adotada tal como foi realizado para as restantes camadas. Pretende-se deste modo comparar os mapas obtidos para cada um dos ensaios individualmente e com os mapas referente as condições de estado de forma a identificar alguma influência entre os módulos de deformabilidade e as condições de estado em estudo.

O mapa da Figura 5.40 apresenta a interpolação para a camada realizada através dos resultados obtidos pelo ensaio ECP, DIP, SSG e Portancèmetre para o último nível de energia (12 passagens).

O mapa da Figura 5.40a) apresenta homogeneidade dos dados obtidos pelo ECP em grande parte da camada. Na análise do mapa da Figura 5.40b) é verificada grandes manchas ao longo da camada onde os resultados obtidos pelo ensaio DIP são apresentados de forma homogénea. No mapa representativo dos dados apresentados pelo ensaio SSG e ilustrados na Figura 5.40c) demonstra uma grande heterogeneidade os resultados apresentados pelo respetivo ensaio, onde existe uma variação dos módulos de deformabilidade de cerca de 100 MPa, o que comparado com os resultados apresentados pelos restantes ensaios é uma variação bastante elevada. O mapa da Figura 5.40d) apresenta que os resultados obtidos pelo ensaio PORT identificam grande parte da superfície do aterro homogénea. Contudo existem zonas em que são apresentados valores de módulos de deformabilidade superiores e zonas onde são apresentados valores menores.

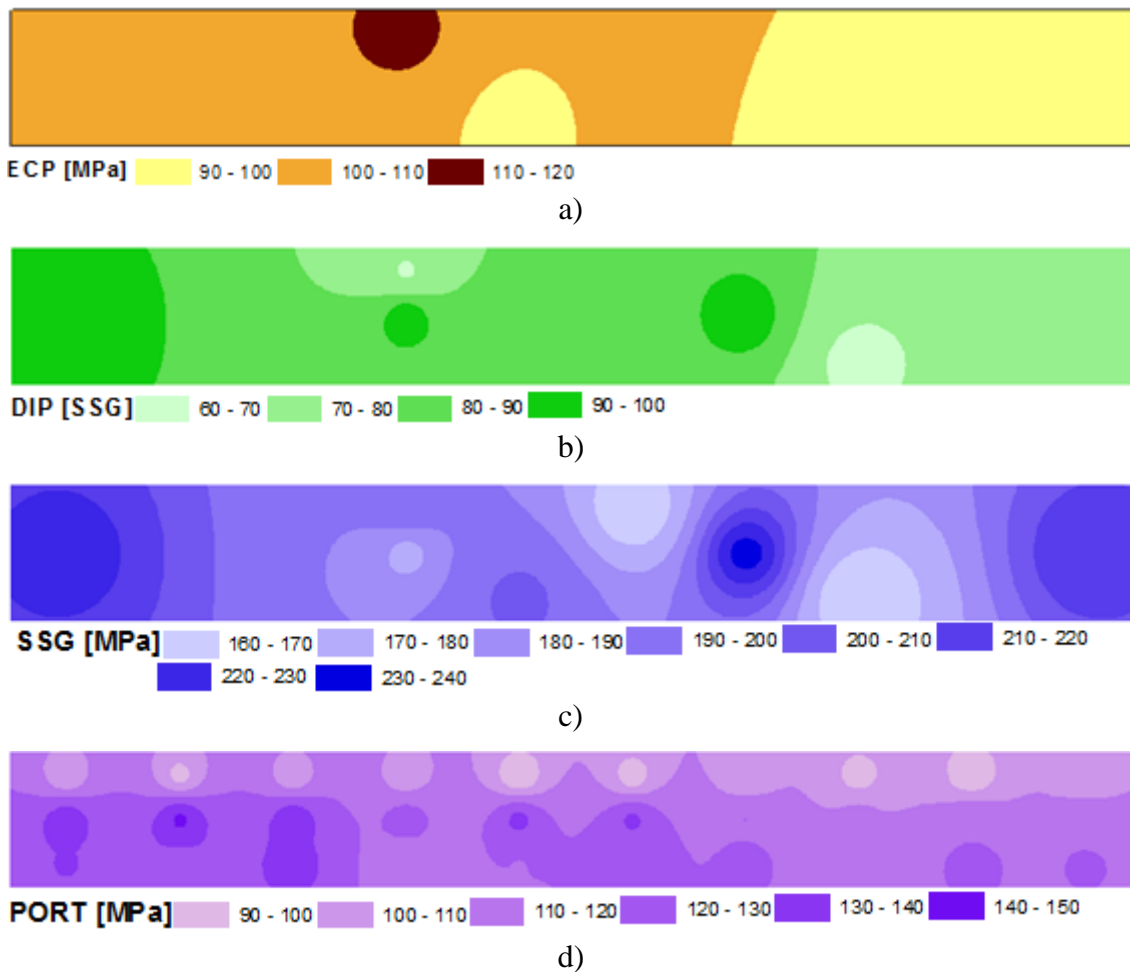


Figura 5.40 – Mapa referente aos dados obtidos através do ensaio; a) ECP; b) DIP; c) SSG; d) PORT, para o nível de energia equivalente as 12 passagens do cilindro na compactação.

A relação entre os resultados apresentados pelos vários ensaios não é de fácil visualização, contudo é identificado que os resultados apresentados pelo ensaio ECP e pelo DIP apresentam os seus resultados inferiores na mesma zona da camada de aterro. No entanto a análise gráfica dos resultados apresentados por estes ensaios não apresentam um bom coeficiente de determinação, pelo que os resultados apresentados pela análise gráfica não são confirmados pela análise espacial dos mesmos dados.

A sobreposição dos mapas relativos aos módulos de deformabilidade com os mapas referentes às condições de estado permitem observar algumas relações.

Por exemplo, relativamente a sobreposição do mapa relativo aos resultados de grau de saturação sobre o mapa da Figura 5.40b) é verificada que para as zonas onde são

apresentados os maiores valores de grau de saturação correspondem as zonas onde são apresentados os maiores valores de módulo de deformabilidade. No entanto a análise gráfica e os resultados apresentados pelos ensaios de laboratório não confirmam a relação identificada na comparação enunciada.

Na Figura 5.41 é apresentado a sobreposição do mapa referente aos valores de grau de saturação sobre os resultados obtidos pelo ensaio DIP de forma a ilustrar o que foi descrito anteriormente.

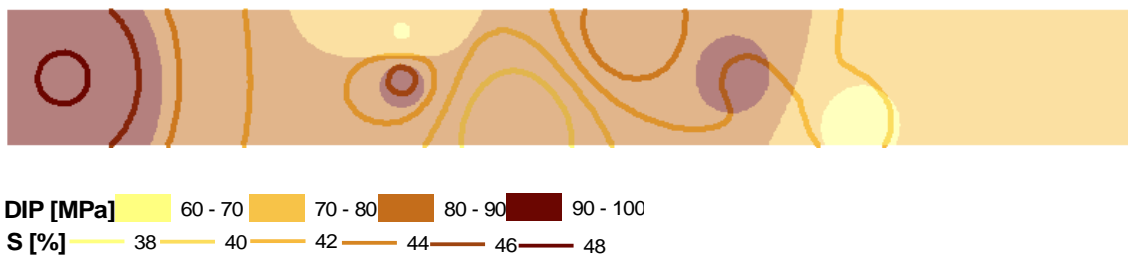


Figura 5.41 – Sobreposição de um mapa de Iso-linhas referente aos dados de grau de saturação sobre o mapa referente aos resultados obtidos através do ensaio DIP, para o nível de energia correspondente as 12 passagens.

A sobreposição do mapa da Figura 5.39b) referente aos dados de índice de vazios com o mapa relativo aos resultados apresentados pelo ensaio SSG (Figura 5.42) apresenta uma relação no sentido de que os valores de módulos de deformabilidade tendem a aumentar com a diminuição dos valores de índice de vazios. Esta tendência vai no encontro dos resultados que foram apresentados pelos ensaios de laboratório que indicam que para índice de vazios inferiores são apresentados valores de sucção superiores.

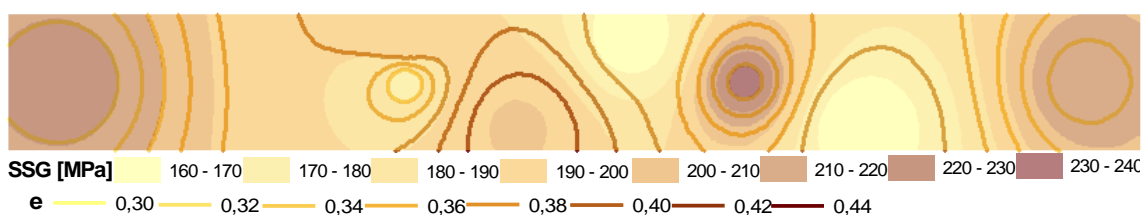


Figura 5.42 – Sobreposição do mapa referente aos dados do índice de vazios sobre o mapa referente aos resultados obtidos pelo ensaio SSG para o nível de energia de compactação correspondente as 12 passagens.

# Capítulo 6 - Conclusões e desenvolvimento futuros

## 6.1 – Conclusões Finais

O presente trabalho teve como objetivo central avaliar a influência das condições de estado (teor em água, índice de vazios, grau de saturação) no comportamento mecânico das camadas de aterro, para tal foram utilizados os dados de ensaios obtidos através de um aterro experimental construído em Évora e apresentados por Martins (2011). Foram realizadas dois tipos de análises de resultados, uma análise gráfica e uma análise espacial. Ainda no presente trabalho foi realizado um conjunto de ensaios de sucção em laboratório de forma a avaliar o comportamento mecânico do solo para diferentes condições de estado impostas e controladas.

A análise dos resultados obtidos em laboratório, permitiu verificar que tal como Barrera (2002) concluiu, os valores de sucção são inferiores para valores de grau de saturação superiores. Ainda os mesmos ensaios permitiram verificar que para valores de índice de vazios inferiores são obtidos valores de sucção superiores. No decorrer dos ensaios de laboratório e em comparação com os ensaios de laboratório realizados em Martins (2011), concluiu-se que para o mesmo tipo de ensaio nas mesmas condições de estado, a utilização de diferentes tipos compactação influencia a estrutura do solo a ensaiar, apresentando diferentes resultados de sucção do solo. Sivakumar e Wheeler (2000), apresentaram as mesmas conclusões no que diz respeito às conclusões retiradas em relação aos resultados apresentados pelos ensaios com diferentes tipos de compactação.

Na análise gráfica dos resultados dos ensaios in-situ, foram obtidas fracas correlações entre os valores apresentados pelos diferentes ensaios. No entanto verificou-se que a camada de aterro com 30 cm de espessura foi a camada que apresentou melhores resultados e conseqüentemente melhores correlações entre os resultados dos diferentes ensaios. Tais resultados para a camada de 30 cm podem ser explicados por uma maior homogeneidade das condições de estado na referida camada de aterro.

Apesar das fracas correlações obtidas entre os resultados dos ensaios in-situ, foram apresentadas algumas relações entre o índice de vazios e os resultados apresentados na correlação entre os ensaios DIP-SSG e entre o PORT-SSG, no último nível de energia de compactação (12 passagens), no sentido de quanto menores forem os índices de vazios maiores serão os módulos de deformabilidade apresentados por estes ensaios, para o nível de energia referido. As mesmas conclusões foram apresentadas pelos ensaios de laboratório e pelos resultados apresentados na análise espacial, o que indicia que o comportamento mecânico das camadas de aterro é influenciado pelo índice de vazios. Contudo estas relações não foram apresentadas em todas as camadas ensaiadas, no último nível de energia, o que conduz a concluir que apesar de ser apresentado uma influência do índice de vazios no comportamento mecânico, existem vários fatores externos que parecem ter influência no comportamento mecânico das camadas, entre eles a espessura das camadas e as condições apresentadas pela camada de fundação.

A análise da influência do teor em água e do grau de saturação, não foi de fácil visualização, pois apesar dos ensaios de laboratórios, apresentarem resultados claros no sentido da sucção diminuir com o aumento do grau de saturação, os resultados apresentados tanto pela análise gráfica como pela análise espacial, foram muitas vezes contraditórios. Denote-se ainda que o ensaio que apresentou a relação no sentido de para maiores valores de grau de saturação são obtidos maiores valores de módulo de deformabilidade foi o ensaio ECP, que é um ensaio pesado, logo apresenta uma área de influência muito superior aos restantes. Como apresenta uma grande área de influência, acredita-se que os valores apresentados pelo ECP, possam ter sido influenciados pelas condições de estado da camada de fundação. Apesar disto, os resultados apresentados entre os restantes ensaios in-situ, não permitiram verificar uma relação consistente da influência direta do teor em água nem do grau de saturação no comportamento mecânico das camadas de aterro ensaiadas.

A análise espacial dos resultados apresentados em Martins (2011) permitiu um estudo do comportamento das camadas de aterro ao longo de toda a sua superfície, o que permitiu através de resultados apresentados por ensaios pontuais avaliar o comportamento de toda a camada de aterro através de interpolações. A apresentação dos mapas correspondentes aos módulos de deformabilidade obtidos por cada um dos ensaios quando comparados entre si, mostram que cada ensaio mostra um comportamento diferente ao longo da camada o que é normal visto que são realizados todos por métodos distintos, sendo que uns tem áreas de influência superiores que outros.

Os mapas correspondentes às condições de estado quando sobrepostos sobre os mapas correspondentes aos módulos de deformabilidade obtidos pelos ensaios in-situ permitiram comparar as variações das condições de estado com as variações dos módulos de deformabilidade obtidos ao longo das superfícies das camadas. Em algumas das comparações verificou-se influências das condições de estado no comportamento ao longo da camada de aterro em análise, no entanto estas influências não são lineares ao longo de toda a camada.

É ainda de salientar, que a análise espacial de dados deste género é de grande importância, pois através de ensaios in-situ, permite apresentar o comportamento mecânico de cada camada, no entanto a análise espacial realizada através do programa ArcGis permitiu apenas a realização de uma análise espacial qualitativa.

Como foi verificado as relações apresentadas entre a análise gráfica e a análise espacial, permite concluir que por vezes os resultados obtidos entre as duas análises são bastante idênticos mas foram apresentadas conclusões divergentes no caso dos resultados apresentados para o ensaio ECP, que pela análise espacial foi verificado que os valores de grau de saturação diminuem com o aumento dos valores de módulos de deformabilidade apresentados pelo referido ensaio. Esta divergência entre resultados apresentados pelas diferentes análises pode ser explicado pelo reduzido número de ensaios ECP realizados para a camada de aterro no último nível de energia, que não são representativos do comportamento da respetiva camada na análise gráfica mas através da análise espacial por interpolação esses dados apresentam uma informação ponderada do comportamento da extensão total da camada. A análise espacial tem o benefício de apresentar uma simulação do comportamento da extensão total da camada de aterro, em

quanto que a análise gráfica apresenta apenas valores de ensaios pontuais, não abrangentes do comportamento total das camadas de aterro. Neste sentido entende-se que os ensaios contínuos, como o Portancemètre, representam uma mais-valia no controlo de qualidade de camadas de aterro.

## **6.2 - Desenvolvimentos Futuros**

O estudo do comportamento dos solos não saturados apresenta ainda vários desafios, nomeadamente a interpretação de ensaios de campo em tensões efetivas. Para tal será necessário a realização de ensaios triaxiais com medição direta da sucção para as condições de estado verificadas in situ. Por outro lado, atendendo às conclusões obtidas quanto á influência do método de compactação na medição indireta da sucção, seria necessário reproduzir os ensaios de sucção para amostras compactadas dinamicamente.

Entende-se ainda ser interessante a realização de uma nova análise espacial que permitisse apresentar uma análise quantitativa de resultados de forma a comparar os resultados diretamente com os resultados da análise gráfica.

Atendendo às limitações dos métodos estatísticos para a deteção de padrões e tendências em bases de dados de elevada complexidade, tem-se assistido ao desenvolvimento de novas ferramentas na área da Descoberta de Conhecimento em Bases de Dados, como por exemplo, Data Mining. Assim, entende-se que a aplicação das mesmas poderão permitir a deteção de padrões e tendências entre as condições de estado e os resultados dos ensaios de campo para determinação de módulos de deformabilidade.

## Capítulo 7 - Referências bibliográficas

Adam, C. and Adam, D. “Modelling of the dynamic load plate test with the light falling weight device.” *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 4: 73–89 (2003).

AFNOR NF P94-117-1. “Soils: reconnaissance et essais. Portance des plates-formes. Partie 1: Module sous chargement statique à la plaque (Ev2).” *Association Française de Normalisation* (2000).

Aguiar, N. “Modelação Geoestatística da pluviosidade: exemplo do evento de 20 de Fevereiro de 2010 na ilha da Madeira.” Trabalho final realizado no âmbito da Unidade Curricular de Modelação em SIG, (2010).

Alshibli, K. A., Abu-Farsakh, M. and Seyman, E. “Laboratory evaluation of the geogauge and light falling weight deflectometer as construction control tools.” *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, September/October*, 560-569 (2005).

Barrera, M. “Estudio experimental del comportamiento hidro-mecánico de suelos colapsables.” Tese de doutoramento, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales & Puertos de Barcelona (2002).

Bicalho, K., Marinho, F., Fleureau, J.-M. and Gomes Correia, A. “Evaluation of filter paper calibrations for indirect determination of soil suctions of unsaturated soils.” *Unsaturated Soils – Alonso & Gens (eds) c 2011 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-60428-4*, 609-613 (2011).

Bicalho, K., Marinho, F. A., Gomes Correia, A., Ferreira, S. and Fleureau, J. “Effect of the filter paper calibration on the soil-water retention curve of an unsaturated compacted silt sand.” *XI Congresso Nacional de Geotécnia, Coimbra, Portugal. CD-ROM* (2008).

- Chandler, R. J., Crilley, M. S. and Montgomery-Smith, G. "A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings." In "Institute of Civil Engineering," volume 92, 82-89 (1992).
- Delage, P., Romero, E. and Tarantino, A. "Recent developments in the techniques of controlling and measuring suction in unsaturated soils." *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering Toll et al. (eds). Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47692-8, 33-52 (2008).*
- DIN 18134. "Determining the deformation and strength characteristic of soil by plate loading test." *Deutsches Institut für Normung (2001).*
- ESRI, Geostatistical Analyst Tutorial, Canada (2002).
- Fortunato, E. M., "Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos Relativos à capacidade de carga." Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, Porto (2005).
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H., Soil mechanics for unsaturated soils. *John Wiley & Sons, Inc. (1993).*
- Fredlund, D. G., Sheng, D. and Zhao, J., "Estimation of soil suction from the soil-water characteristic curve." *Canadian Geotechnical Journal*, 48: 186-198 (2011).
- Genuchten, M. Th., "A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils." *Soil Science J.* 44: 892-898 (1980).
- Martins, J., Gomes Correia, A., Ramos, L., Marcelino, J., Caldeira, L. and Delgado, J. "Measurement of vibrations induced by high-speed trains." *8 th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Illinois., 2: 1311-1319 (2009).*
- Martins, J. P., "Compaction and its influence on the structural behaviour of high speed railways." Tese de Doutoramento – Universidade do Minho (2011).
- M. Shabbir Hossain, Ph.D., and Alex K. Apeageyi, Ph.D. "Evaluation of the lightweight deflectometer for in-situ determination of pavement layer moduli." *Virginia Transportation Research Council, March 2010.*

- Nazzal, Munir D., “Field Evaluation of in-situ Test Technology for  $Q_C/Q_A$  During Construction of Pavement Layers and Embankments” Tese de mestrado – Universidade do Estado de Louisiana, (2003).
- Oliveira, O. M. and Marinho, F.A.M “Evaluation of filter paper calibration.” *UNSAT 2006* (2006).
- Quibel, A. “New in situ devices to evaluate bearing capacity and compaction of unbound granular materials.” *Unbound Granular Materials. Laboratory Testing, In-situ Testing and Modelling. Gomes Correia A. (ed.), Technical University of Lisbon*, 141-151 (1999).
- Ravichandran, Nadarajah and Krishnapillai, Shada H., “A Flexible Model for Moisture-Suction Relationship for Unsaturated Soils and Its Application.” *International Journal of Geosciences*, 2: 204-213, 2011.
- Reis, André Manuel Soares, “Comportamento Hidro - Mecânico de um solo compactado com diferente teor em água e mesmo índice de vazios.” *Dissertação para obtenção de grau de mestre*, IST, 2010.
- Richards, L. “A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution.” *Soil Science*, 51: 377-386 (1941).
- Santos, J. A. “Compactação - Elementos Teóricos”, *Elementos de apoio à cadeira de obras geotécnicas*. Instituto Superior Técnico (2008).
- Seyman, Ekrem., “Laboratory evaluation of in-situ tests as potential quality control/quality assurance tools.” Tese de Mestrado, Universidade do Estado de Louisiana, (2003).
- Sivakumar, V. and Wheeler, S. “Influence of compaction procedure on the mechanical behavior of an unsaturated compacted clay. Part 1: Wetting and isotropic compression.” *Géotechnique*, 50(4): 359-368 (2000).
- Sun, D. A., Sheng, D. C., Cui, H. B. and Sloan, S. W. “A density-dependent elastoplastic hydro-mechanical model for unsaturated compacted soils.” *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 31: 1257-1279 (2007).

Tarantino, A. and Tombolato, S. "Coupling of hydraulic and mechanical behavior in unsaturated compacted clay." *Géotechnique*, 55(4): 307-317 (2005).

Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., D. E., P. and Clifton, A. "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction." *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 379-392 (1996).

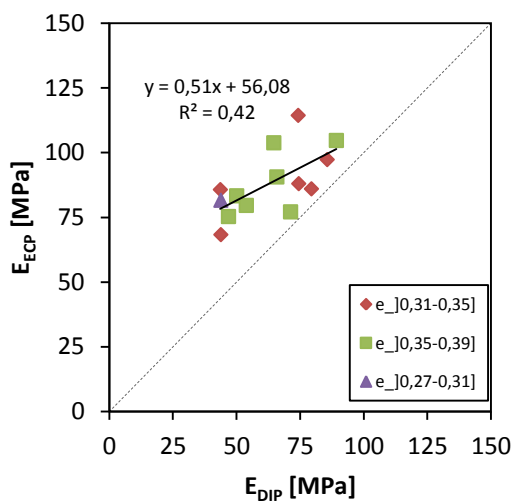
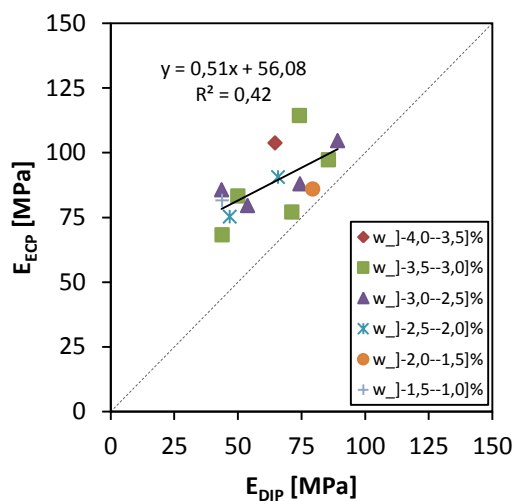
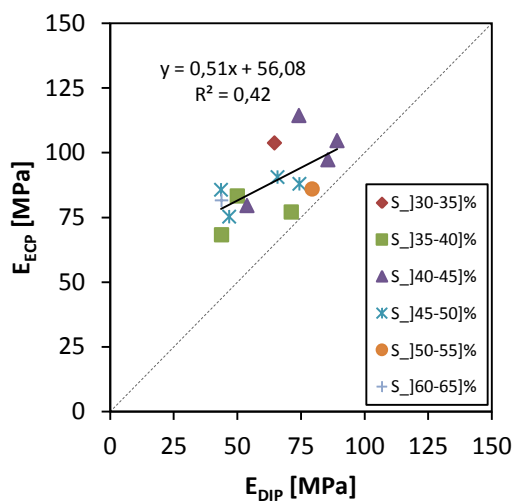
Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., and Pufahl, D. E. "The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till." *Géotechnique*, 49(2): 143-159,(1999).

# Capítulo 8 - Anexos

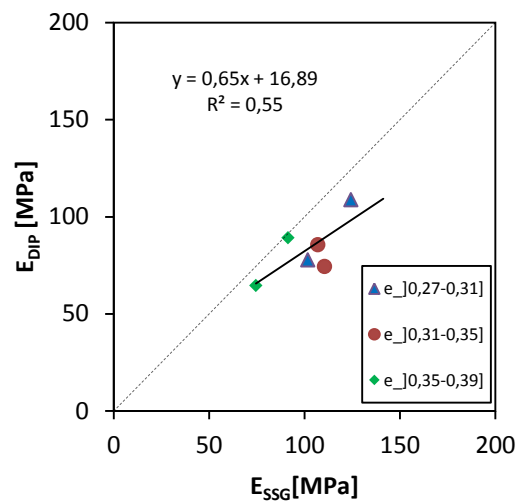
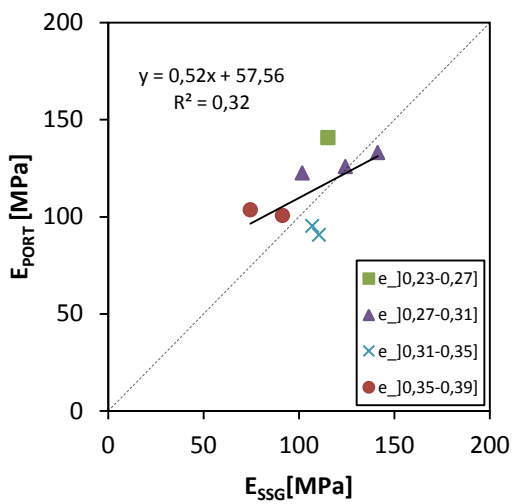
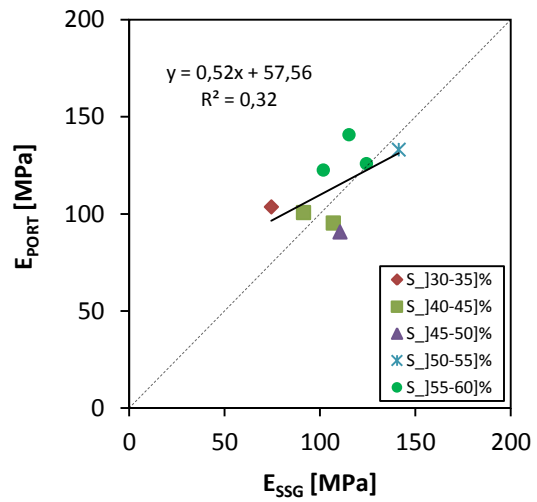
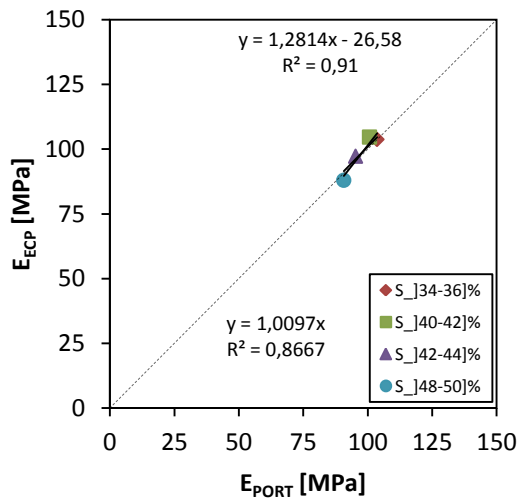
## Anexo 1

Correlações apresentadas através dos resultados obtidos pelos ensaios in-situ.

Camada 30cm\_w-2, para todos os níveis de energia.



Camada 30cm\_w-2, para o nível de energia equivalente as 12 passagens do cilindro.



## Anexo 2

Resultados apresentados pelos ensaios de sucção em laboratório

Tabela A1 – Tabela resumo dos resultados obtidos em laboratório referentes aos ensaios de sucção. ( $e=0,373$ )

Tabela Resumo dos Ensaio de sucção			
e = 0,373			
Índice de vazios, e	Teor em água, w (%)	Grau de saturação, Sr (%)	Sucção, S (kPa)
0,373	4,5	31,9978	597,6514
0,377	4,4	30,9255	644,3293
0,383	4,4	30,4518	531,0058
0,367	6,4	46,2585	57,4989
0,369	6,4	45,9484	56,3049
0,371	6,5	46,4248	54,3698
0,375	8,4	59,4105	20,1094
0,365	8,3	60,3075	15,3199
0,366	8,4	60,9022	17,5660
0,374	10,3	73,0508	6,2417
0,372	10,3	73,4612	7,1923
0,372	10,3	73,4453	6,8942

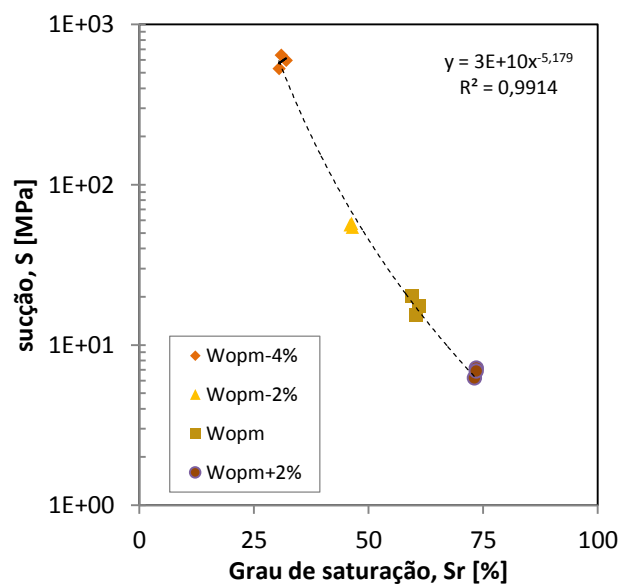


Figura A1 – Curva de retenção apresentada em laboratório para o índice de vazios ( $e=0,373$ )

Tabela A2 - Tabela resumo dos resultados obtidos em laboratório referentes aos ensaios de sucção. ( $e=0,331$ )

Tabela Resumo dos Ensaios de sucção			
e = 0,331			
Índice de vazios, e	Teor em água, w (%)	Grau de saturação, Sr (%)	Sucção, S (kPa)
0,3340	4,3	34,1168	696,3170
0,3370	4,5	35,3858	431,2434
0,3340	4,4	34,9102	428,4842
0,3320	6,3	50,2904	64,0895
0,3350	6,4	50,6269	60,8636
0,3360	6,5	51,2649	59,9270
0,3321	8,4	67,0200	18,8603
0,336	8,4	66,2500	26,6424
0,335	8,4	66,4478	22,9048

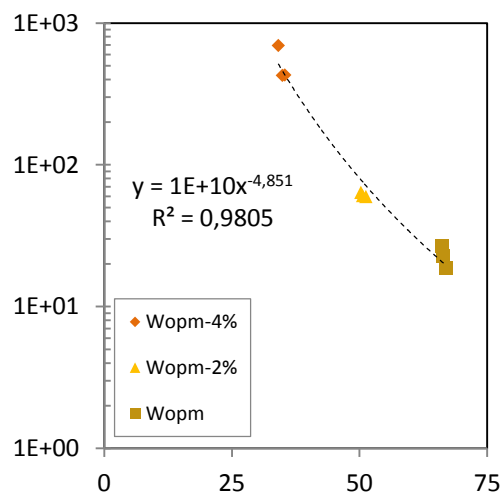


Figura A2 - Curva de retenção apresentada em laboratório para o índice de vazios ( $e=0,331$ )

Tabela A3 - Tabela resumo dos resultados obtidos em laboratório referentes aos ensaios de sucção. ( $e=0,419$ )

Tabela Resumo dos Ensaio de sucção			
e = 0,419			
Índice de vazios, e	Teor em água, w (%)	Grau de saturação, Sr (%)	Sucção, S (kPa)
0,422	4,4	27,6303	342,3477
0,423	4,6	28,8180	446,7946
0,426	4,4	27,3709	436,6804
0,415	6,4	40,8675	61,1399
0,413	6,4	41,0654	64,4182
0,416	6,4	40,7692	59,0495
0,416	8,4	53,5096	17,0574
0,425	8,4	52,3765	21,2822
0,417	8,4	53,3813	22,9116
0,416	10,5	66,8870	7,7991
0,415	10,4	66,4096	8,0028
0,42	10,4	65,6190	8,2869

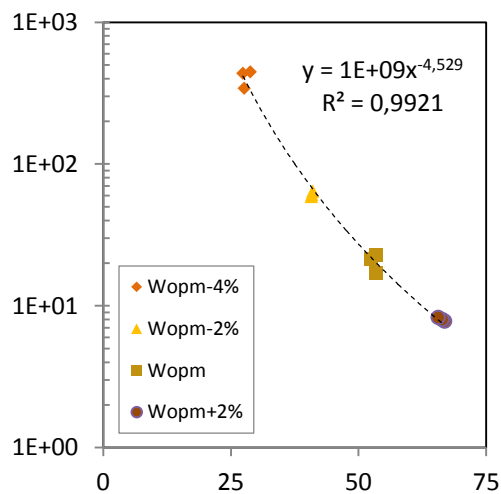


Figura A2 - Curva de retenção apresentada em laboratório para o índice de vazios ( $e=0,419$ )