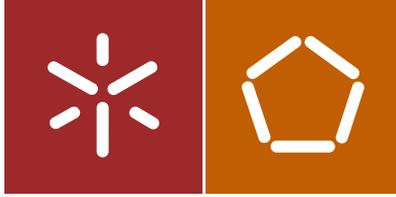




Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Ana Isabel Baptista Pereira

INFLUÊNCIA DA TÉCNICA DA ELABORAÇÃO  
DE PROVETES LABORATORIAIS NA  
QUANTIFICAÇÃO DA DEFORMABILIDADE E  
RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS SOLOS



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Ana Isabel Baptista Pereira

INFLUÊNCIA DA TÉCNICA DA ELABORAÇÃO  
DE PROVETES LABORATORIAIS NA  
QUANTIFICAÇÃO DA DEFORMABILIDADE E  
RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS SOLOS

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação do  
Professor Doutor Nuno Miguel Araújo

---

“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade”

Albert Einstein

Aos meus pais e irmã!

iii



## AGRADECIMENTOS

Reservo este espaço para agradecer a todas aquelas pessoas que fizeram parte deste meu percurso escolar e principalmente, aqueles que me fizeram ser quem sou.

Ao meu pai por tornar possível todos os meus sonhos e por me ensinar que a forma mais fácil de conseguirmos atingir um objetivo é acreditarmos no que somos.

À minha mãe por ser a mulher mais admirável que conheço e por me apoiar sempre nas minhas decisões.

À minha irmã por ter sempre acreditado naquilo que sou e por representar da melhor forma a “irmã mais velha”.

À minha princesa e afilhada Carolina, que apesar de pequenina, tornou a minha vida mais completa com o sorriso sincero que me dá todos os dias.

Ao meu Carlinhos pelo apoio, dedicação, amizade, compreensão, respeito e principalmente por ser o melhor amigo que alguma vez tive.

Ao meu irmão de coração Pedro pelo carinho e amizade que temos.

Às minhas amigas Vânia, Ana João e Carina pela amizade, companheirismo, compreensão e ligação que criamos.

Ao Professor Nuno Miguel Faria Araújo, na qualidade de meu orientador, pelo apoio, disponibilidade, partilha de conhecimentos prestados na realização deste trabalho e principalmente, por me ter obrigado a trabalhar sozinha.

Aos técnicos de laboratório José Gonçalves e César Gonçalves, ligados ao departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, pela ajuda, apoio, disponibilidade e amizade.

Ao meu amigo Augusto Carvalho pela ajuda e pela amizade demonstrados ao longo deste percurso.

A todos os professores com quem me cruzei, nesta etapa da minha vida, pois foram delineadores de muito o que sei e sou. No entanto, quero dar um apreço especial aos professores Eduardo Pereira, Tiago Miranda e Nuno Araújo que se desmontaram, durante o meu percurso académico, professores de qualidade e que, de certa forma, incentivaram o meu empenho escolar.

A todos os meus amigos que me acompanharam desde o meu primeiro ano académico, nomeadamente, Bruno Amadeu, Daniel Fernandes, João Soares e David Dias pela nossa verdadeira amizade.

A todos o meu mais sincero OBRIGADO!

## RESUMO

De modo a acompanhar as exigências associadas aos projetos de engenharia há uma crescente necessidade de melhorar as características dos solos pois, por vezes, estes na sua forma natural não contêm características satisfatórias para a utilização na construção civil.

A reconstituição de provetes em laboratório permite estudar as características dos solos, quer a nível de resistência mecânica e deformabilidade, de forma a promover um conhecimento mais alargado sobre o comportamento dos mesmos quando sujeitos a projetos de Engenharia.

A compactação dos solos é o processo utilizado para conferir ao solo, que se encontra na forma natural, melhor características estruturais, ou seja, menor deformabilidade e maior resistência mecânica. O processo de compactação pode ser realizado de diversas formas, sendo que estas podem ou não produzir características estruturais distintas. Neste caso de estudo, o objetivo é perceber a influência da técnica de elaboração de provetes laboratoriais na quantificação da resistência mecânica e deformabilidade do solo. Assim, foram selecionados dois tipos de solo, nomeadamente, um solo residual granítico (incoerente) e uma argila (coerente). Estes dois solos foram compactados por quatro técnicas de compactação distintas: compactação Proctor, compactação com o martelo vibratório, compactação manual e compactação Harvard. Foram realizadas amostras compactadas pelas diferentes técnicas de compactação em estudo, para ensaio na caixa de corte direto e edómetro. Estes dois ensaios permitiram perceber o objetivo deste caso de estudo. Este conhecimento é de extrema importância pois permite verificar qual a sensibilidade dos solos á técnica de compactação aplicada, o que poderá decidir uma atitude diferente enquanto engenheiros civis.

**Palavras-chave:** Solo residual granítico; Argila; Compactação; Compactação Proctor; Compactação com martelo vibratório; Compactação manual; Compactação Harvard; Estrutura do solo.



## ABSTRACT

In order to face the demands related to engineering projects, there is an increasing need to improve soil composition since it is usually not appropriate for civil construction in its natural state.

Laboratory reconstituted samples make the study of soil features possible both in terms of mechanical resistance and deformation, promoting a deeper knowledge concerning its behavior when used for engineering projects.

Soil compaction is the process used to provide natural soil with better structural features. This means less deformation and greater mechanical resistance. The compaction process can be performed in different ways, however these can either produce distinct structural characteristics or not.

In this case study, the objective is to understand the influence of the technique used to prepare laboratory samples on the quantification of mechanical resistance and deformation of the soil. Therefore, two types of soil have been selected, namely, residual granite soil (non coherent) and a clay (coherent). These two types of soil have been compacted using four compaction methods: Proctor compaction, vibrating hammer compaction, manual compaction and Harvard compaction. Samples have been made using these different techniques for direct shear box and oedometer testing. These two tests clarified the objective of this case study. This knowledge is paramount in verifying the sensitivity of the soil regarding the compaction method applied, and this can influence the behavior of civil engineers.

**Key words:** Residual granite soil; Clay; Compaction; Proctor compaction; Vibrating hammer compaction; Manual compaction; Harvard compaction; soil structure.



---

# ÍNDICE

1	Introdução e Motivação do Trabalho.....	1
1.1	Contextualização.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Organização do Documento.....	3
2	Revisão Bibliográfica.....	5
2.1	Técnicas de compactação em laboratório.....	5
2.1.1	Introdução.....	5
2.1.2	Considerações sobre a interação entre as partículas e o teor em água.....	7
2.1.3	Técnicas.....	10
2.1.4	Fatores que influenciam o comportamento mecânico dos solos compactados.....	12
2.1.5	Relações entre os métodos de compactação no comportamento dos solos coesivos.....	15
2.1.6	Influência do método de compactação sobre o comportamento de solos coesivos.....	18
2.2	Outros estudos realizados.....	22
2.3	Síntese.....	23
3	Materiais, técnicas de compactação e metodologias.....	27
3.1	Solos.....	27
3.2	Técnicas de compactação.....	29
3.3	Equipamentos.....	30
3.4	Metodologia.....	32
3.4.1	Peso volúmico natural e seco.....	32
3.4.2	Preparação das amostras.....	35
3.4.3	Compactação Proctor.....	38

3.4.4	Compactação com martelo vibratório.....	39
3.4.5	Compactação manual.....	39
3.4.6	Compactação Harvard .....	40
3.4.7	Ensaio de corte direto .....	41
3.4.8	Ensaio edométrico .....	44
4	Apresentação e análise de resultados.....	49
4.1	Caixa de corte direto .....	49
4.1.1	Características iniciais das amostras.....	49
4.1.2	Consolidação das amostras.....	51
4.1.3	Evolução do deslocamento vertical em função do deslocamento horizontal.....	52
4.1.4	Evolução da tensão de corte em função do deslocamento horizontal .....	55
4.1.5	Evolução da tensão de corte em função da tensão normal .....	56
4.1.6	Conclusões.....	61
4.2	Edômetro.....	62
4.2.1	Características iniciais das amostras.....	62
4.2.2	Índice de vazios inicial e ao longo do carregamento aplicado .....	63
4.2.3	Parâmetros definidores das relações tensões- deformações .....	67
4.2.4	Módulo de deformabilidade volumétrico do solo.....	74
4.2.5	Coefficiente de consolidação .....	76
4.2.6	Permeabilidade do solo.....	80
4.2.7	Conclusões.....	81
5	Conclusão .....	87
5.1	Considerações gerais.....	87
5.2	Trabalhos futuros .....	88
	Referências bibliográficas .....	89

Anexo I..... 95



**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1- Curva de Compactação .....	6
Figura 2 - Curva de Compactação – Peso volúmico máximo ( $\gamma_d, máx$ ), Teor em água ótimo ( $w_{opt}$ ) .....	7
Figura 3- Influência do método de compactação na estrutura de um solo (Lambe 1958).	9
Figura 4- Influência de pequenas variações no teor de água nas curvas de compressão simples não confinada .....	13
Figura 5- Influência de pequenas variações do teor em água sobre a resistência à compressão simples ( $R_c$ ) .....	13
Figura 6- Variação da pressão de sucção (PS) como função do teor de água. ....	14
Figura 7- Influência do tempo de cura das amostras depois da compactação sobre o seu comportamento mecânico.....	15
Figura 8- Variação da resistência à compressão simples, dependendo do tempo de armazenamento.....	15
Figura 9- Estrutura dos Solos .....	16
Figura 10- Influência do método de compactação (pisoteamento e estático) nas características tensão-deformação de uma amostra de argila. a) Amostras compactadas no ramo seco; b) Amostras compactadas no ramo húmido (Mitchell, 1964).....	17
Figura 11- Influência do método de compactação sobre a deformabilidade (Bell,1977). .....	18
Figura 12- Influência da técnica de compactação na resistência, ensaio CBR, Seed e Chan (1959).....	20
Figura 13- Influência de modo a compactação de uma argila lodoso na permeabilidade, Mitchel <i>et al.</i> (1965). ....	20

Figura 14- Influência do método de compactação na retração axial do "silte de Orly", Bouche 1967.....	21
Figura 15- Influência do método de compactação sobre a resistência relativa de vários solos, Seed et Chan (1959). ....	21
Figura 16- Curva granulométrica dos solos utilizados para o caso de estudo.....	27
Figura 17- Curva de compactação dos solos utilizados para o caso de estudo .....	28
Figura 18- Equipamentos disponíveis no laboratório de Geotecnia (DEC) da Universidade do Minho .....	30
Figura 19- Moldes utilizados para realizar a compactação dos solos.....	31
Figura 20- Equipamentos utilizados e disponíveis no laboratório de Geotecnia da Universidade do Minho, na realização de cada técnica de compactação em estudo.....	32
Figura 21- Procedimento seguido para determinação do peso volúmico através da compactação Proctor leve.....	34
Figura 22- Processo seguido para preparação das amostras para ensaio.....	37
Figura 23- Processo de compactação de uma camada de solo .....	37
Figura 24- Compactação Proctor.....	38
Figura 25- Compactação com o martelo vibratório.....	39
Figura 26- Compactação manual.....	40
Figura 27- Compactação Harvard .....	41
Figura 28- Esquema representativo da caixa de corte. ....	42
Figura 29- Corte da célula edométrica .....	45
Figura 30- Consolidação das amostras de solo residual granítico construídas pelas diferentes técnicas (a,b,c,d) .....	51

---

Figura 31- Consolidação das amostras de argila construídas pelas diferentes técnicas (a,b,c,d).....	52
Figura 32- Evolução do deslocamento vertical em função do deslocamento horizontal das amostras de solo residual granítico, construídas pelas diferentes técnicas de compactação .....	53
Figura 33- Evolução do deslocamento vertical em função do deslocamento horizontal das amostras de solo residual granítico, construídas pelas diferentes técnicas de compactação .....	54
Figura 34- Evolução da tensão de corte em função do deslocamento horizontal, para cada uma das tensões aplicadas, nas amostras de solo residual granítico .....	55
Figura 35- Evolução da tensão de corte em função do deslocamento horizontal, para cada uma das tensões aplicadas .....	56
Figura 36- Evolução da tensão de corte em função da tensão normal aplicada nas amostras construídas pelas diferentes técnicas de compactação .....	57
Figura 37- Evolução da tensão de corte em função da tensão normal aplicada nas amostras construídas pelas diferentes técnicas de compactação .....	58
Figura 38- Relação entre a tensão normal aplicada e a tensão de corte das amostras construídas pelas várias técnicas de compactação.....	59
Figura 39- Relação entre a tensão normal aplicada e a tensão de corte das amostras construídas pelas várias técnicas de compactação.....	60
Figura 40- Diagrama que relaciona o índice de vazios com as tensões efectivas aplicadas nas amostras.....	64
Figura 41- Relação entre a variação do índice de vazios com o carregamento aplicado às amostras .....	65
Figura 42- Diagrama que relaciona o índice de vazios com as tensões efectivas aplicadas nas amostras.....	66

Figura 43- Relação entre a variação do índice de vazios com o carregamento aplicado às amostras .....	67
Figura 44- Valores do índice de compressibilidade e recompressibilidade do solo residual granítico correspondente a cada técnica de compactação usada.....	68
Figura 45- Valores do índice de compressibilidade e recompressibilidade da argila correspondente a cada técnica de compactação usada.....	69
Figura 46- Valores de $a_v$ das amostras de solo residual granítico construídas pela aplicação das diferentes técnicas de compactação em estudo .....	70
Figura 47- Valores de $m_v$ das amostras de solo residual granítico construídas pela aplicação das diferentes técnicas de compactação em estudo .....	70
Figura 48- Variação da altura das amostras de solo residual granítico construídas pelas diferentes técnicas de compactação .....	71
Figura 49- Valores de $a_v$ das amostras de argila construídas pela aplicação das diferentes técnicas de compactação em estudo .....	72
Figura 50- Valores de $m_v$ das amostras de argila construídas pela aplicação das diferentes técnicas de compactação em estudo.....	73
Figura 51- Variação da altura da amostra ao longo do campo de tensões aplicadas.....	74
Figura 52- Valor do módulo de deformabilidade volumétrico de cada amostra de solo residual granítico construídas pelas diferentes técnicas de compactação, ao longo dos patamares de carga aplicados .....	75
Figura 53- Valor do módulo de deformabilidade volumétrico de cada amostra de argila construídas pelas diferentes técnicas de compactação, ao longo dos patamares de carga aplicados .....	76
Figura 54 - Evolução do assentamento em função do logaritmo do tempo .....	77
Figura 55- Processo seguido para retirar o valor de $s_{100}$ .....	77
Figura 56- Processo seguido para retirar os valores de $s_A$ e $s_B$ .....	78

---

Figura 57- Processo para retirar o valor de $t_{50}$ .....	79
Figura 58- Valor do coeficiente de consolidação da argila por patamar de carga e por técnica de compactação em estudo .....	79
Figura 59- Valor da permeabilidade da argila por patamar de carga e por técnica de compactação em estudo .....	80
Figura 60- Percentagens da variação dos parâmetros do solo quando compactados com martelo vibratório, comparativamente com a compactação Proctor .....	81
Figura 61- Percentagens da variação dos parâmetros do solo quando sujeitos a compactação manual, comparativamente com a compactação Proctor.....	82
Figura 62- Percentagens da variação dos parâmetros do solo quando sujeitos a compactação Harvard, comparativamente com a compactação Proctor .....	82
Figura 63- Percentagens da variação dos parâmetros do solo quando sujeitos a compactação com martelo vibratório, comparativamente com a compactação Proctor.	84
Figura 64- Percentagens da variação dos parâmetros do solo quando sujeitos a compactação manual, comparativamente com a compactação Proctor.....	85
Figura 65- Percentagens da variação dos parâmetros do solo quando sujeitos a compactação Harvard, comparativamente com a compactação Proctor .....	85



**ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 1- Propriedades de compactação do solo residual granítico de Guimarães (Soares, 2013).....	28
Tabela 2- Propriedades de compactação da argila de Odemira (Silva, 2013).....	28
Tabela 3- Características dos solos utilizadas para o caso de estudo .....	29
Tabela 4- Força vertical (N) aplicada a cada uma das amostras para o ensaio de corte direto.....	43
Tabela 5- Designação das amostras de solo residual granítico construídas para ensaio na caixa de corte .....	43
Tabela 6- Designação das amostras de argila construídas para ensaio na caixa de corte	44
Tabela 7- Patamares de carga e descargas feitas no ensaio edométrico em cada uma das amostras realizadas.....	46
Tabela 8- Amostras construídas dos diferentes tipos de solo para o ensaio edométrico	47
Tabela 9- Características iniciais das amostras de solo residual granítico compactadas pelas várias técnicas de compactação em estudo.....	49
Tabela 10- Características iniciais das amostras de argila compactadas pelas várias técnicas de compactação em estudo .....	50
Tabela 11- Valores do ângulo de atrito correspondente a cada técnica de compactação em estudo.....	58
Tabela 12- Valores do ângulo de atrito correspondente a cada uma das técnicas de compactação usadas.....	60
Tabela 13- Valores iniciais característicos das amostras compactadas pelas várias técnicas de compactação em estudo .....	62
Tabela 14- Valores iniciais característicos das amostras compactadas pelas várias técnicas de compactação em estudo .....	63



**ÍNDICE DE EQUAÇÕES**

Equação 1 .....	34
Equação 1 .....	41
Equação 2 .....	46
Equação 3 .....	47
Equação 4 .....	47
Equação 5 .....	47
Equação 6 .....	47
Equação 7 .....	47
Equação 8 .....	47
Equação 9 .....	47
Equação 10 .....	47
Equação 11 .....	78
Equação 12 .....	78
Equação 13 .....	79



## ÍNDICE DE SÍMBOLOS E SIGLAS

$h_0$ - Altura da amostra de solo

$C_C$ - Índice de compressibilidade do solo

$C_R$ - Índice de recompressibilidade do solo

$G_s$ - Densidade das partículas do solo

$P_a$ - Pressão de sucção

$R_c$ - Resistência à compressão

$a_v$ - Coeficiente de compressibilidade do solo

$c_v$ - Coeficiente de consolidação do solo

$e_0$ - Índice de vazios inicial

$m_v$ - Coeficiente de compressibilidade volumétrico do solo

$s_0$ - Assentamento inicial corrigido

$s_{100}$ - Assentamento correspondente a 100 %

$s_{50}$ - Assentamento correspondente a 50 %

$s_A$ - Assentamento correspondente ao primeiro instante

$s_B$ - Assentamento correspondente ao quarto instante a contar do primeiro

$t_{100}$ - Abcissa de  $s_{100}$  correspondente ao tempo

$t_{50}$ - Abcissa de  $s_{50}$  correspondente ao tempo

$w_l$ - Índice de liquidez do solo

$w_p$ - Índice de plasticidade do solo

$\gamma_{natural}$ - Peso volúmico natural do solo

$\delta_h$ - Deslocamento horizontal do solo

$\delta_v$ - Deslocamento vertical do solo

$\varepsilon_a$ - Extensão axial

$\rho_d$ - Massa volúmica seca do solo

$\rho_{dmax}$ - Massa volúmica seca máxima do solo

$\rho_w$ - Peso volúmico da água

$\sigma_1$ - Maior tensão principal

$\sigma_3$ - Menor tensão principal

$\sigma_v$ - Tensão vertical aplicada

$\omega_{ótimo}$ - Teor em água ótimo do solo

$\Delta H$ - Variação da altura da amostra

$\Delta e$ - Variação do índice de vazios

$E$ - Módulo edométrico do solo

$G$ - Densidade das partículas do solo

$e$ - Índice de vazios do solo

$k$ - Permeabilidade do solo

$l$ - Largura da amostra de solo

$t$ - Tempo

$v$ - Velocidade de corte

$\delta$ - Assentamento do solo

$\varepsilon$ - Extensão

$\rho$ - Peso volúmico do solo

$\tau$ - Tensão de corte

$\varphi$ - Ângulo de atrito

$\omega$ - Teor em água no solo



# 1 INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Será o planeta Terra apenas um conjunto de matéria compactada, que lhe fornece uma capacidade estrutural inimitável?

Ao longo dos anos, foram desenvolvidas várias teorias de como se formaram os planetas, nomeadamente o planeta Terra, e acredita-se que este poderá se ter formado pela agregação de poeira cósmica em rotação, aquecendo-se depois, por meio de violentas reações químicas. Esta agregação de matéria, que supostamente formou o nosso planeta, tornou a Terra numa estrutura densa e resistente, capaz de suportar forças incalculáveis. Este processo descrito pelos astrónomos poder ser comparado ao processo da compactação dos solos. Isto porque, o objetivo principal do processo de compactação é conferir ao solo uma maior resistência estrutural, tornando-o mais denso.

Com o evoluir da humanidade, e conseqüentemente com as necessidades básicas da mesma e a preocupação, no que diz respeito, a sustentabilidade do nosso planeta, há uma procura acrescida na utilização dos solos como material estrutural na engenharia civil. Esta procura inspira uma necessidade de aumentar os nossos conhecimentos sobre os solos, na sua empregabilidade e nas melhores condições de utilização, retirando assim, o máximo proveito das suas características naturais. No entanto, os solos na sua forma natural, normalmente, não contém características satisfatórias para a utilização na construção civil e, por esse motivo, surgiu o processo de compactação.

O processo de compactação permite agregar todas as partículas, fazendo com que a distância entre elas seja menor (mais densos) e com isso conseguir um material mais resistente e menos deformável. No entanto, as técnicas estudadas para compactar solos são abrangentes e não conferem todas o mesmo resultado, independentemente do solo. Segundo Head (2006) o teste selecionado para a compactação do solo depende da natureza da obra, do tipo do material utilizado e da técnica de compactação. No entanto,

nenhum autor consegue afirmar qual a melhor técnica de compactação para um determinado solo, para obter as melhores características do material. Quer a resistência mecânica, quer a deformabilidade de um determinado material são propriedades estruturais que a compactação confere ao solo e os mais desejados em projetos de Engenharia Civil.

Os solos colocados em obra, sem passarem pelo processo de compactação, logo com elevado índice de vazios, ficam mais suscetíveis a sofrer assentamentos e de serem atravessados pela água, o que pode originar o próprio arraste das partículas mais finas, conduzindo por vezes ao colapso da obra. Além disso, o solo fica menos capaz de suportar cargas.

Estes fatores levaram à necessidade de se compactar os solos, para se conseguirem principalmente os seguintes objetivos: evitar futuros assentamentos (totais e diferenciais), melhorar a capacidade do solo suportar cargas e garantir maior estabilidade do material em obra.

## **1.2 OBJETIVOS**

Neste estudo pretende-se analisar a influência da escolha da técnica de elaboração de provetes laboratoriais, para a quantificação dos parâmetros de deformabilidade e de resistência mecânica dos solos, que podem ser influenciados por particularidades associadas à elaboração dos provetes, tais como: tensões de pré-consolidação, anisotropia, planos de descontinuidade, repetibilidade dos resultados, entre outros.

Quando se pretende quantificar os parâmetros de deformabilidade e de resistência mecânica dos solos, a técnica de elaboração dos provetes é definida de uma forma relativamente livre, pelo que ainda não se entendeu qual a influência da técnica para os resultados destes parâmetros.

A reconstituição de provetes laboratoriais fornece uma base para os procedimentos de controlo utilizados no local que, normalmente, são feitos por meios mecânicos. Assim, ao serem testadas as várias técnicas de compactação, em laboratório, com recurso a provetes, consegue-se perceber as (in)compatibilidades existentes entre eles, tendo em conta os parâmetros desejados.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este documento será dividido em 5 capítulos, cada capítulo referente a uma etapa concluída do processo de avaliação do caso de estudo. Assim, cada uma destes capítulos apresenta os seguintes objetivos:

- Capítulo 1: Refere-se à introdução ao tema, onde contextualiza o tema envolvido no caso de estudo, dando uma breve perspectiva da sua importância na engenharia civil. É neste capítulo que se clarificam os objetivos pretendidos na escrita desta dissertação e, por fim, disponibiliza ao leitor um resumo do que será apresentado ao longo deste documento.
- Capítulo 2: É designado por revisão bibliográfica e refere-se a variados conceitos indispensáveis à concretização deste estudo, assim como, investigações que já foram realizadas dentro do tema desta dissertação. Este capítulo ajuda na compreensão e discussão dos resultados.
- Capítulo 3: Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados, as técnicas de compactação escolhidas e a metodologia aplicada para a concretização desta investigação.
- Capítulo 4: são mostrados os resultados obtidos do caso de estudo, com uma exaustiva análise dos resultados de forma a entender se a técnica de elaboração de provetes tem realmente influência na deformabilidade e resistência mecânica dos solos, que se classifica como objetivo principal desta investigação.
- Capítulo 5: São explanadas de forma crítica as conclusões gerais sobre os resultados obtidos, tendo sempre por perto a intenção de clarificar e contribuir para um melhor entendimento, no que diz respeito ao comportamento dos solos, quando submetidos a diferentes condições de compactação.

No final do documento são apresentadas as referências bibliográficas e um anexo.



## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 TÉCNICAS DE COMPACTAÇÃO EM LABORATÓRIO**

#### **2.1.1 Introdução**

A compactação é um processo que permite melhorar as propriedades mecânicas dos solos para propósitos de engenharia. O objetivo básico da compactação consiste em obter um novo material, pois a compactação gera deformações permanentes no solo que modificam as propriedades naturais do mesmo, a fim de obter um comportamento satisfatório para a aplicação a que é destinado (Baptista, 1976; Balmaceda, 1991).

Esta técnica pode ser conseguida por aplicações de cargas dinâmicas ou estáticas no solo, que conduzem a uma diminuição do volume aparente de uma dada massa e, conseqüentemente, a redução do índice de vazios. Esta redução resulta, fundamentalmente, da expulsão do ar dos vazios do solo e de um aumento na densidade das partículas do solo, motivado por um melhor rearranjo das partículas (Raghavan e Ohu, 1985).

Com a diminuição do índice de vazios do solo e, conseqüentemente, do aumento da massa volúmica aparente seca, existe uma maior área de contacto entre as partículas que conduz a um aumento da capacidade do solo suportar cargas. Além disso, como o solo fica mais denso e compacto, este terá menos probabilidade de sofrer assentamentos (deformações) e dificultará a passagem de água, tornando-o menos permeável.

Inicialmente, o volume da massa do solo integra as partículas sólidas, ar e água. A diminuição do volume é devida a aplicação de cargas que reduzem os vazios do solo. Durante o processo de compactação, a saturação aumenta devido às diferenças no

volume de água do solo não serem significativas. Hilf (1975) afirma que o teor em água do material antes e depois da compactação é praticamente o mesmo.

Proctor, em meados dos anos 30, procurou aperfeiçoar a técnica de compactação com os primeiros trabalhos sobre compactação de aterros, pois antes esta técnica era realizada empiricamente, sem qualquer fundamento técnico. Os trabalhos realizados por Proctor permitiram uma grande evolução nesta técnica pois permitiu entender o princípio básico da compactação tão importante do ponto de vista da engenharia civil.

Proctor estabeleceu uma relação entre a massa específica seca e o teor em água, como mostra a figura 1:

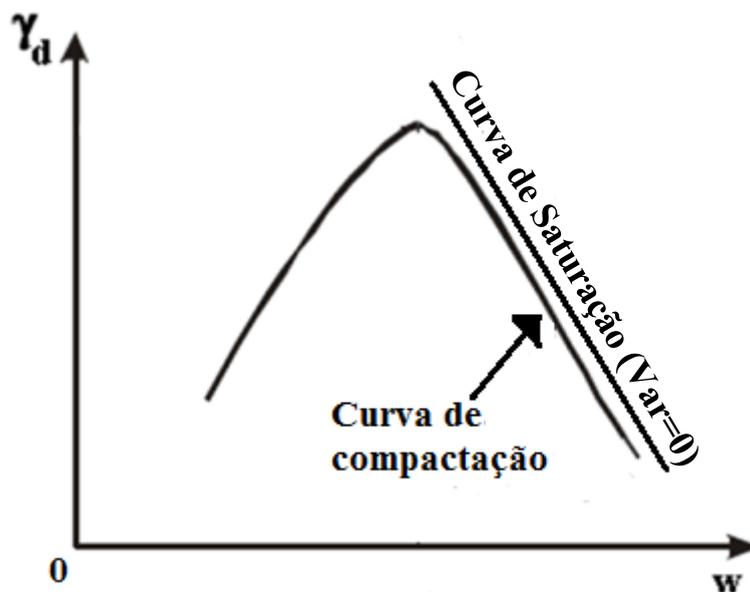


Figura 1- Curva de Compactação

Com o aumento do teor em água, a massa específica seca aumenta, como se observa na figura 1. Quando um solo é compactado com uma determinada energia de compactação, o seu peso volúmico é em função do teor em água do solo. Assim, para cada teor em água, verifica-se uma maior ou menor eficiência do processo de compactação na densidade do solo. Esta eficiência depende, essencialmente, do efeito de atrito entre as partículas e a água. Segundo Proctor, existe um determinado teor em água em que a água impede a expulsão do ar, não reduz o atrito nem tem influência no rearranjo das partículas, o que não acresce a densidade ao solo. Portanto, significa que existe um teor

em água ótimo para cada tipo de solo, ou seja, o teor em água que corresponde à relação ideal entre as partículas, a água e o ar, como representa a figura 2.

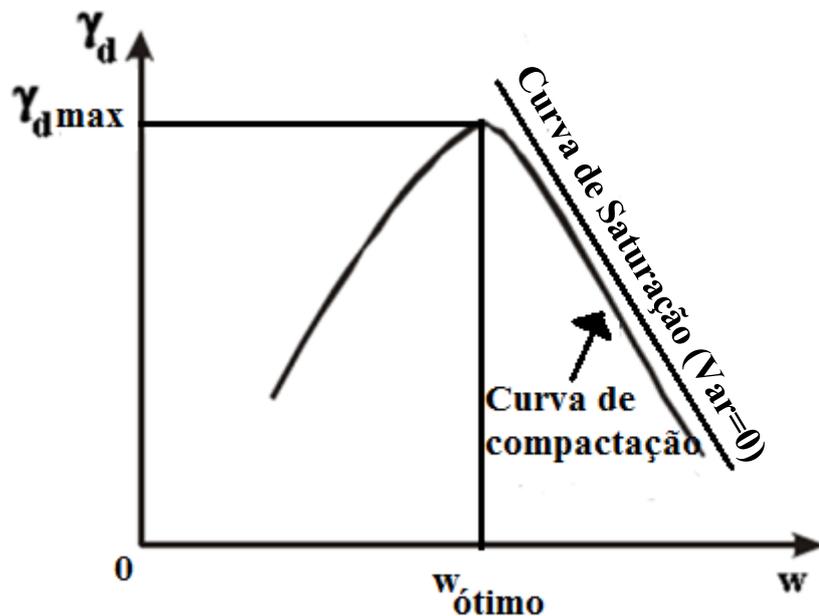


Figura 2 - Curva de Compactação – Peso volúmico máximo ( $\gamma_{d,máx}$ ), Teor em água ótimo ( $w_{opt}$ )

Proctor definiu três fatores essenciais que influenciam a densidade de um solo: o tipo de solo, o teor em água de compactação e a energia de compactação.

Mitchell *et al.* (1965) provou que além dos fatores citados por Proctor, a técnica de compactação aplicada também influencia os resultados.

### 2.1.2 Considerações sobre a interação entre as partículas e o teor em água

Em laboratório, o objetivo dos ensaios de compactação é definir o teor em água ótimo de um determinado solo, para obter uma determinada densidade e conseguir cumprir com outros objetivos desta técnica, relativamente a um material: melhorar a sua resistência ao corte, permeabilidade e deformabilidade. Senço (1997) afirma que para toda e qualquer execução de obra que necessitem de construção de aterros, a obtenção de maiores densidades possíveis é um fator de estabilidade e segurança, inclusivamente pela melhor impermeabilidade que este solo compactado apresenta.

O termo estrutura dos solos, nesta dissertação, refere-se essencialmente à redistribuição e orientação das partículas sólidas do solo. Segundo Mitchell (1993) a formação da estrutura de um solo após a compactação é em função do tipo de solo, teor em água, intensidade e a forma como se aplica a energia de compactação, sendo a estrutura um dos fatores mais importantes para conhecer o comportamento dos solos. Quando se trata de solos compactados é necessário ter em conta o tipo de compactação empregada (campo ou laboratório), pois cada tipo de compactação origina estruturas de solos bastante distintas (Cruz, 1967).

Segundo vários autores (Garcia-Bengochea *et al.*, 1979; Acar e Oliveri, 1990; Benson e Daniel, 1990), são obtidos diferentes arranjos das partículas consoante o tipo de solo, o método de compactação utilizado e a energia aplicada. O novo arranjo que a compactação confere ao solo determinará as suas características como material estrutural, ou seja, a resistência, compressibilidade, permeabilidade e deformabilidade do solo.

O aumento da energia de compactação, em qualquer tipo de solo, implica uma diminuição no teor em água ótimo e no aumento da densidade das partículas (Dhawam e Bahri, 1957; Baptista, 1976). Vários estudos foram realizados, relativamente à energia de compactação, para se conseguir as relações das características dos distintos métodos de compactação (Dhawam e Bahri, 1957; Bell, 1977; Johnson e Sallberg, 1962).

Lambe (1958) estudou as estruturas de um solo argiloso quando compactado dinamicamente em função da relação entre o teor em água e a energia de compactação aplicada.

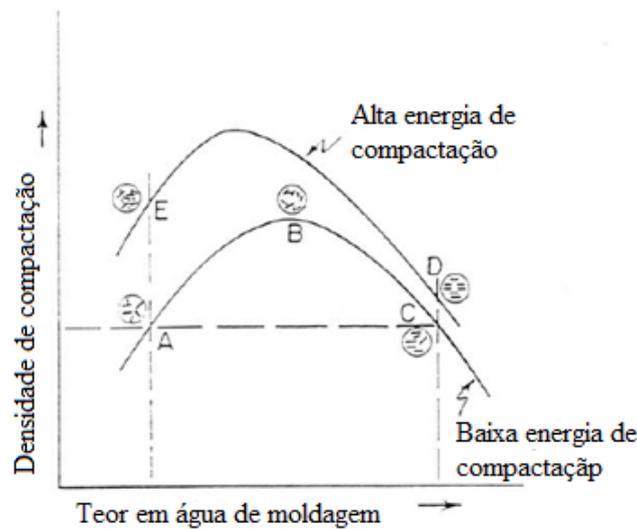


Figura 3- Influência do método de compactação na estrutura de um solo (Lambe 1958).

Ao observar-se a figura 3, conclui-se que para a mesma energia de compactação e peso específico, a estrutura do solo argiloso é diferente conforme o teor em água aplicado na compactação da amostra. O método de compactação utilizado, no ramo seco, pouco afeta a estrutura do solo, assim como nas propriedades do solo compactado, e normalmente resulta em estruturas floculadas. Já, no ramo húmido, a técnica (ou método) de compactação utilizado influencia na estrutura final do solo, assim como, nas propriedades do mesmo, originando estruturas dispersas. Para o mesmo teor em água, quanto maior a energia de compactação maior o grau de dispersão entre as partículas. Este modelo representa, de uma forma muito simples, a estrutura dos solos compactados e permite que sejam justificados o comportamento dos mesmos (Lambe, 1958; Johnson e Sallberg, 1962; Seed et al, 1962; Cruz, 1967). Segundo os autores Lambe e Whitman (1979), geralmente, um solo que apresente uma estrutura floclada após a compactação, relativamente a um solo, com o mesmo índice de vazios, mas que apresenta uma estrutura dispersa, têm maior resistência, menor deformabilidade e menor permeabilidade.

Os materiais com a mesma densidade podem apresentar diferentes comportamentos mecânicos quando compactados com diferentes técnicas de compactação em diferentes teores de humidade (Bell,1977).

Estudos realizados por Lambe (1958), Mitchell *et al.* (1965) e Seed e Chan (1959) explicam a forma em que as diferentes estruturas são obtidas e os efeitos que elas

provocam na resistência, na permeabilidade, na pressão da água dos vazios, no inchamento, entre outros. Diferentes métodos de compactação provocam distintas quantidades de deformação por corte. Quanto maior esta deformação, maior o grão de dispersão produzido (Seed e Chan, 1959).

O processo de compactação e o teor em água de compactação são fatores que influenciam a estrutura resultante de uma massa de solo (Lambe, 1958); (Seed e Chan, 1959); (Mitchell et al., 1965); (Garcia-Bengochea et al., 1979); (Acar e Oliveri, 1990) e (Benson e Daniel, 1990).

Em suma, pode afirmar-se que o teor em água afeta a estrutura de um solo, e, conseqüentemente, o comportamento mecânico do mesmo. O arranjo estrutural, junto com a mineralogia do solo, determinam o comportamento de engenharia (Queiroz de Carvalho e Simmons, 1997 apud Santos e Martinez, 2003).

### **2.1.3 Técnicas**

Os ensaios de compactação em laboratório fornecem a base para procedimentos de controlo utilizados no local. A realização da compactação em laboratório pode ser feita de diversas formas, sendo que o principal objetivo destes é assemelhar-se ao máximo com a compactação em campo, no caso da reconstrução de provetes. No entanto, os mecanismos de compactação em campo são difíceis de reproduzir no laboratório, pois estes executam a compactação por meio de várias ações simultaneamente, ou seja, amassamento, impacto e vibração.

Segundo Head (2006) existem vários tipos de ensaios de compactação em laboratório, sendo que o teste selecionado, para ser usado como base de comparação, dependerá da natureza da obra, do tipo de solo e do tipo do equipamento de compactação utilizado.

Carvalho *et al.* (1987) afirma que é muito difícil definir um método de reconstituição de provetes em laboratório, especialmente quando se trata de solos coesivos. As características mecânicas e hidráulicas dos solos não coesivos são essencialmente influenciadas pelas características físicas macroscópicas (granulometria, índice de

vazios, teor em água, homogeneidade). Por outro lado, no caso de solos coesivos, as características microscópicas (estrutura, interação físico-químicas) também são de grande importância. No caso de solos coesivos compactados, as características macroscópicas e microscópicas dependem das condições de compactação (método utilizado, energia de compactação, teor em água), mas também do tipo de preparação inicial do solo (secagem).

Os métodos de compactação em laboratório podem ser classificados nas seguintes categorias: compactação por impacto ou dinâmica; compactação estática ou por pressão; compactação por amassamento ou pisoteamento e compactação por vibração. Head (2006) nomeia quatro métodos de compactação, que estão indicados e descritos na norma BSI (1990d), bem como alguns métodos semelhantes indicados em ASTM (1970, apud Head, 2006), exceto o método de martelo vibratório, que se inserem nas categorias anteriormente citadas como métodos de compactação em laboratório.

A compactação por impacto ou dinâmica é caracterizada pela queda de um peso, de uma determinada altura, um certo número de vezes, numa camada de solo colocada num molde cilíndrico. Segundo Balmaceda (1991), quando se varia um destes fatores (altura, número de golpes, espessura da camada) varia-se a energia de compactação, e conseqüentemente, o resultado final. Um exemplo da compactação por impacto ou dinâmica é um método nomeado por Head (2006) designado por compactação Proctor, que pode ser realizado, segundo o autor, através de compactação leve (método compactador com 2.5 kg) indicado na norma BSI (1990d) e da compactação pesada (método compactador com 4.5 kg), apontado na norma BSI (1990d);

A compactação estática ou por pressão caracteriza-se por aplicar uma pressão uniformemente distribuída sobre o solo (Balmaceda, 1991). Consiste em compactar com uma prensa, atribuindo-lhe uma determinada pressão (constante ou variável) durante um certo período de tempo. O autor Cruz (1967) afirma que a compactação estática é a que induz menores tensões de corte. Head (2006) também refere um método de compactação em laboratório, denominada compactação Harvard presente em ASTM (1970, apud Head, 2006), pertencente a esta categoria.

A compactação por amassamento ou pisoteamento consiste na sucessiva aplicação de pressões sobre pequenas áreas da amostra de solo. A compactação é realizada através de

um sistema que contém uma haste em metal, onde uma peça cilíndrica, que contém no seu interior uma mola, é pressionada verticalmente no sentido da amostra. Este método de compactação é que produz maiores tensões de corte e a que melhor representa as condições de campo quando compactado com o rolo pé de carneiro (Cruz, 1967). Outros autores também afirmam esta semelhança entre este método de compactação em laboratório com a compactação feita em campo através do rolo pé de carneiro (Baptista, 1976; Seed et al., 1962).

Head (2006) apresenta como método de compactação em laboratório a compactação por vibração descrito na norma BSI (1990d). No entanto, existem outros métodos de compactação, não citados pelo autor, sendo estes: a compactação através do martelo vibratório, por vibro compressão e mesa vibratória.

#### **2.1.4 Fatores que influenciam o comportamento mecânico dos solos compactados**

Carvalho et al. (1987) no estudo sobre a reconstituição de provetes em laboratório, analisou alguns fatores que podem alterar o comportamento mecânico dos solos compactados. O autor afirma que o comportamento mecânico dos solos compactados, além de estar relacionado com o método de compactação, também pode ser alterado por outros fatores tais como:

- Alterações na energia de compactação;
- As alterações no teor em água antes e depois da compactação;
- O tempo de retenção entre a compactação e a realização de ensaios mecânicos.

Assim, o autor, compactou uma série de amostras na mesma unidade de peso específico seco, mas com variações no teor em água. As curvas do ensaio de compressão simples realizada nestas amostras indicam mudanças significativas na resistência (figura 5) e uma mudança menos acentuada na rigidez, com o teor em água (figura 4).

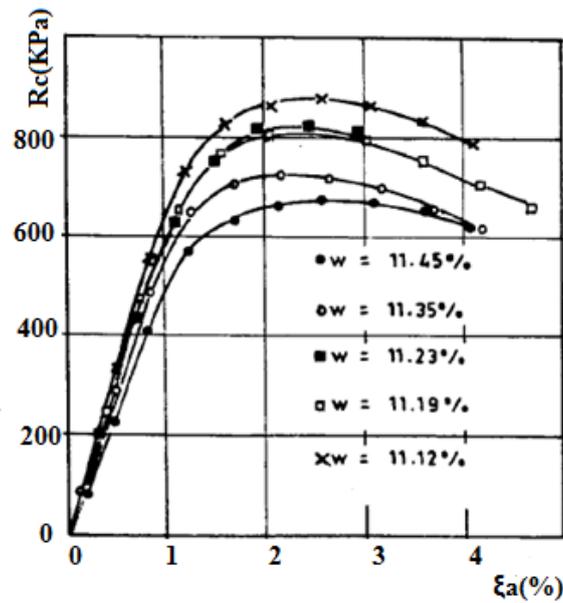


Figura 4- Influência de pequenas variações no teor de água nas curvas de compressão simples não confinada

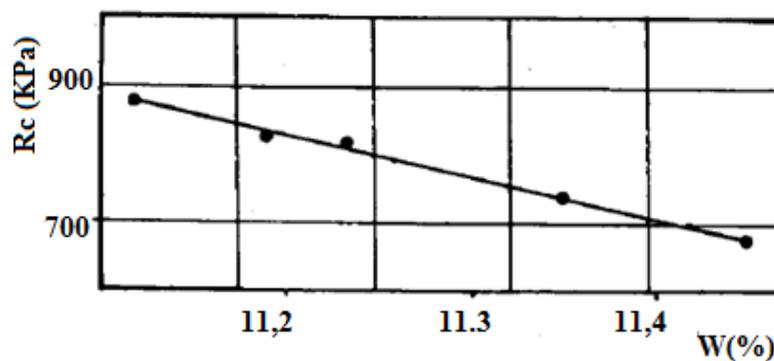


Figura 5- Influência de pequenas variações do teor em água sobre a resistência à compressão simples ( $R_c$ )

Considerando-se que a estrutura do solo permanece quase a mesma para essas pequenas variações no teor em água o que é normal é que a rigidez da amostra varie pouco. Por outro lado, a figura 6 mostra que essas pequenas variações no teor em água irão resultar em alterações muito significativas na pressão de aspiração e, assim, a coesão aparente que, explica claramente, as variações na resistência à compressão simples. Os resultados mostram que é essencial controlar, rigorosamente, o teor em água na compactação durante a preparação das amostras (Carvalho et al. 1987).

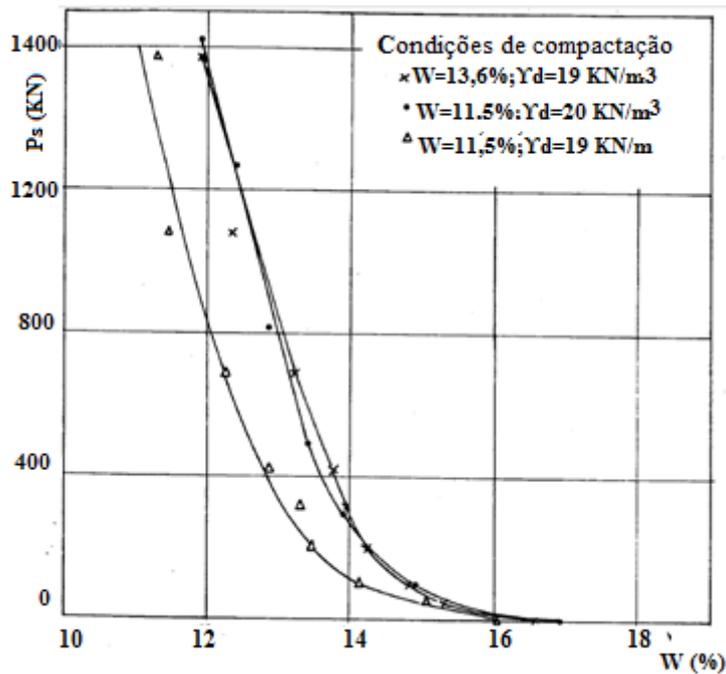


Figura 6- Variação da pressão de sucção (PS) como função do teor de água.

Além do estudo relatado anteriormente, Carvalho et al. (1987) estudou a evolução do comportamento mecânico, ao longo do tempo, após a compactação. As amostras foram reconstituídas estaticamente, tudo ao mesmo teor em água e á mesma tensão de compactação. O conjunto de amostras foi colocado em sacos de plástico selados e armazenada numa câmara húmida, para evitar qualquer alteração no conteúdo de água. Ensaio de compressão efetuados, no dia da compactação e 3, 5, e 14 dias após a compactação, mostraram um aumento da rigidez e resistência ao longo do tempo (figura 7). A Figura 8 mostra que depois de 10 dias a resistência ao corte tende a estabilizar. Mitchell (1960) (depois de Seed et al. 1960), citado por Carvalho et al. (1987) explica que após a compactação, permanece o fato de que certa quantidade de energia interna provoca um rearranjo dos grãos, levando a uma estrutura mais rígida, e assim, floclada. Este rearranjo de grãos seria seguido por uma redistribuição da água absorvida e catiões de dupla camada.

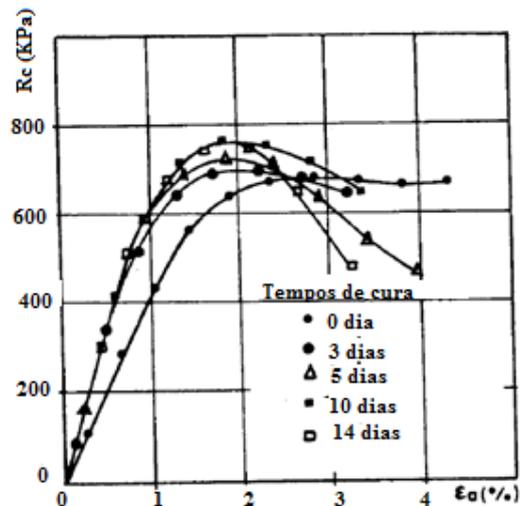


Figura 7- Influência do tempo de cura das amostras depois da compactação sobre o seu comportamento mecânico.

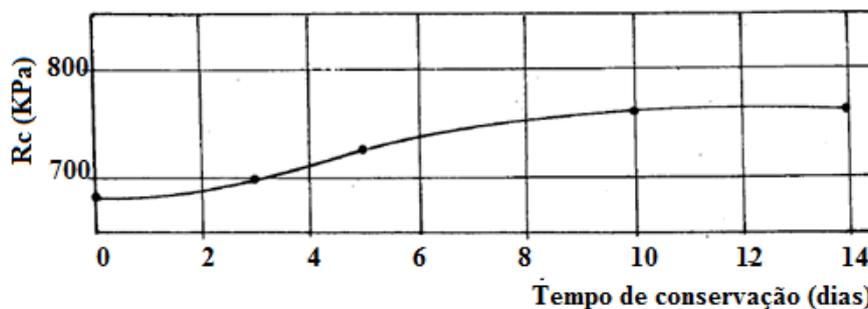


Figura 8- Variação da resistência à compressão simples, dependendo do tempo de armazenamento.

Com base nos resultados apresentados acima, parece necessário adotar um intervalo mínimo de 10 dias entre a reconstituição de amostras e os testes mecânicos (Carvalho *et al.* 1987).

### 2.1.5 Relações entre os métodos de compactação no comportamento dos solos coesivos

No ramo seco, não existe registo de diferenças quanto à resistência ao corte do solo, quando compactadas pelo método estático e por pisoteamento, concluindo-se assim, que as estruturas resultantes são semelhantes. Poderia esperar-se este facto se as forças de atração devidas ao baixo teor em água, fossem relativamente grandes para contrapesar

as distintas tensões de corte induzidas pelos métodos de compactação utilizados. No entanto, se as amostras forem compactadas do lado húmido, com um teor em água acima do ótimo, compactadas pelos métodos supracitados, induzem tensões de corte crescentes, e conseqüentemente, as estruturas desenvolvidas apresentarão grau de dispersão crescente, o que resulta em menores resistências ao corte (Cruz, 1967).

Mitchell (1964) afirma que, quando uma argila é compactada no ramo húmido, as amostras apresentam uma estrutura dispersa, mas quando compactadas no lado seco apresentam uma estrutura floculada (figura 9).



Figura 9- Estrutura dos Solos

O mesmo autor acrescenta, relativamente às diferentes condições de compactação, que estas podem produzir diferentes resistências e a pressão da água nos vazios do solo características. Argilas compactadas com a mesma densidade e teor em água, para níveis de saturação inferiores a 80%, irão apresentar uma estrutura muito idêntica, assim como, a relação tensão-deformação, independentemente do método de compactação. Por outro lado, argilas compactadas com a mesma densidade, mas com o teor em água ótimo, ou seja, acima dos 85%, quando compactadas com diferentes métodos poderão apresentar diferenças consideráveis na estrutura do solo, e por conseguinte, diferentes propriedades, influenciadas pela tensão-deformação inculcidas pelo método adotado. A figura seguinte, confirma a relação humidade-compactação-estrutura, pelos métodos de compactação estática e pisoteamento, ilustrando a relação tensão de desvio-deformação axial de amostras compactadas no ramo seco e no ramo húmido.

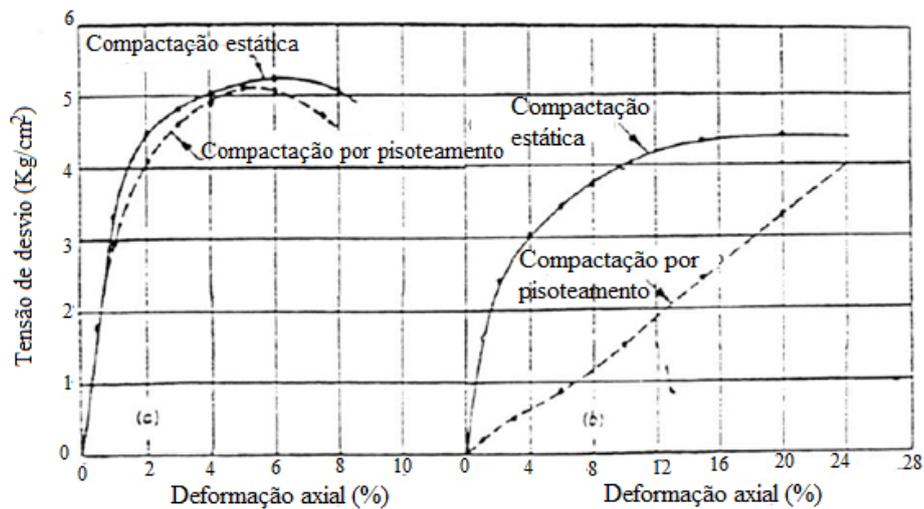


Figura 10- Influência do método de compactação (pisoteamento e estático) nas características tensão-deformação de uma amostra de argila. a) Amostras compactadas no ramo seco; b) Amostras compactadas no ramo húmido (Mitchell, 1964)

Ao compactar uma amostra preparada no ramo húmido, pelo método estático, ocorre uma pequena ou nenhuma deformação por corte, gerando uma estrutura levemente floculada (Seed e Chan, 1959). Por outro lado, ao compactar-se amostras através dos métodos por pisoteamento, impacto ou vibração, por vezes induzem a maiores quantidades de deformações por corte, produzindo estruturas mais dispersas.

Segundo Bell (1977), o método estático é o mais efetivo para uma argila silto-arenosa ensaiada. O mesmo autor refere que a eficiência dos outros métodos de compactação é influenciada pelo teor em água do solo, a força do golpe por unidade de área e pela velocidade e duração do impacto.

Bell (1977) apresenta na figura 11 o efeito do método de compactação relativamente à deformabilidade de uma amostra de solo. Da sua análise, verifica-se que as curvas relativas aos ensaios das amostras compactadas pelos métodos dinâmico e por pisoteamento são semelhantes. Verifica-se que para teores em água acima da ótima, a tensão de corte apresenta-se semelhante para os métodos de compactação por pisoteamento e dinâmico. No entanto, para o método estático, constata-se que não existe grande discrepância em relação aos teores em água abaixo da ótima. Por outro lado, quando as amostras são compactadas no ramo seco, ou seja, para teores em água abaixo da ótima (em cerca de 13%, de acordo com a figura 11) a tensão de corte é superior para

o método dinâmico, menor para o pisoteamento e, aproximadamente, metade para a compactação pelo método estático.

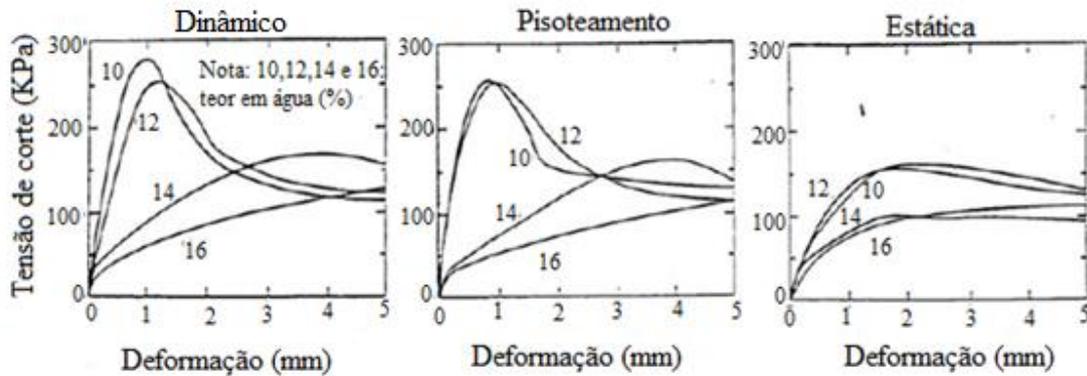


Figura 11- Influência do método de compactação sobre a deformabilidade (Bell,1977).

No que diz respeito, aos outros fatores que podem influenciar a deformabilidade do solo, quando compactados com diferentes métodos de compactação, nomeadamente, o número de camadas, número de golpes por camada, pressão na ponta do aplicador de carga e o tempo de estância da pressão no processo de compactação por pisoteamento, Seed e Monismith (1954) observaram nos seus estudos que, ao aumentar-se o número de camadas ou de aplicações da carga por camada, o efeito produzido na amostra assemelha-se à amostra compactada pelo método de compactação dinâmico. A amostra apresenta o mesmo efeito, quando é aumentada a pressão no aplicador da carga no pisoteamento e a força de golpe no dinâmico.

### 2.1.6 Influência do método de compactação sobre o comportamento de solos coesivos

Segundo Carvalho *et al.* (1987) as variações no comportamento hidráulico e mecânico do mesmo solo compactado por diferentes métodos são devido ao facto de estes métodos induzirem deformações por corte de amplitude muito diferentes; além disso, dependendo da sua composição, o solo será mais ou menos sensível com o método de compactação utilizado. Solos com uma forte tendência para flocular (predominância de forças de atracção) ou dispersão (predominância de forças repulsivas) não são muito

sensíveis ao método de compactação; Seed *et al.* (1960), citado por Carvalho *et al.* (1987) indica, em particular, que o comportamento do solo é influenciado pelo método de compactação como com o teor em água maior do que o teor em água ótimo. Parece preferível considerar que a evolução deste comportamento está relacionada com o desenvolvimento da camada dupla. De acordo com o Teoria de Lambe (1958a), indicado por Carvalho *et al.* (1987) o desenvolvimento da camada dupla provoca o aparecimento de forças de repulsão, promovendo uma maior orientação das partículas. O aumento do teor em água também pode ter um efeito lubrificante/anti lubrificante e diminuir/aumentar o atrito entre as partículas. A evolução da orientação das partículas vai depender da intensidade das deformações por corte, ela própria em função do teor em água, da energia e do modo de compactação.

De acordo com Seed *et al.* (1960, apud Carvalho *et al.*, 1987) a ordem das técnicas de compactação na qual a geração de estruturas dispersas é maior é: compactação estática, compactação vibratória e a compactação do tipo "kneading" (amassamento).

As Figuras 12, 13 e 14 mostram a influência do método de compactação e o teor em água na resistência, retração e permeabilidade. Em geral, estes resultados mostram que a suscetibilidade do comportamento do solo pode depender fortemente do teor em água. Por outro lado, Seed et Chan (1959), citado pelo autor Carvalho *et al.*, (1987), demonstraram que a sensibilidade do modo de resistência à compactação depende da natureza do solo e do nível de deformação em questão (Figura 15).

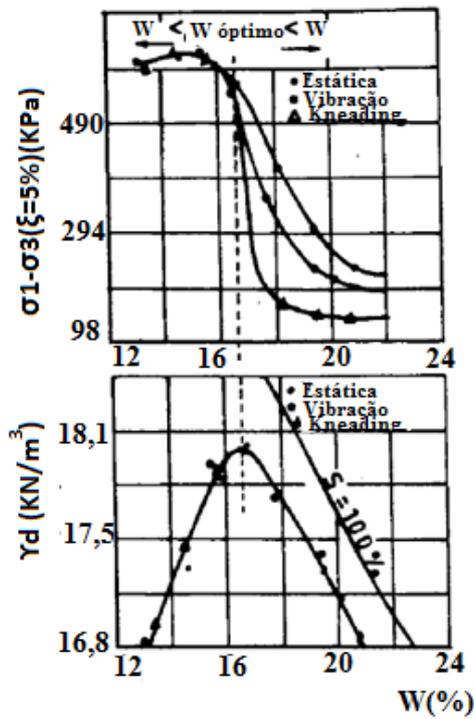


Figura 12- Influência da técnica de compactação na resistência, ensaio CBR, Seed e Chan (1959).

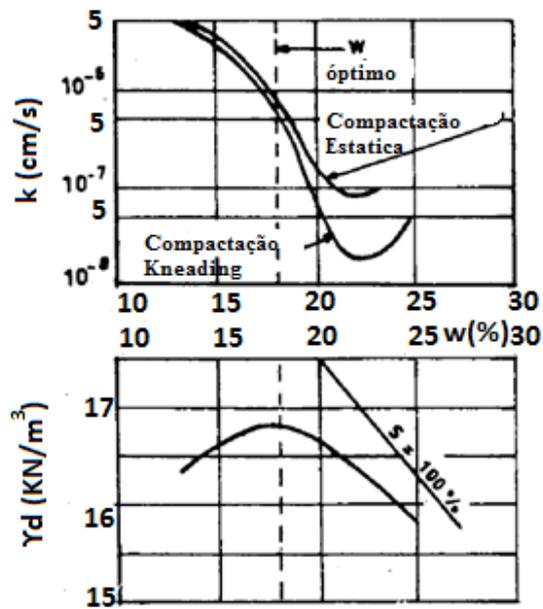


Figura 13- Influência de modo a compactação de uma argila lodoso na permeabilidade, Mitchel *et al.* (1965).

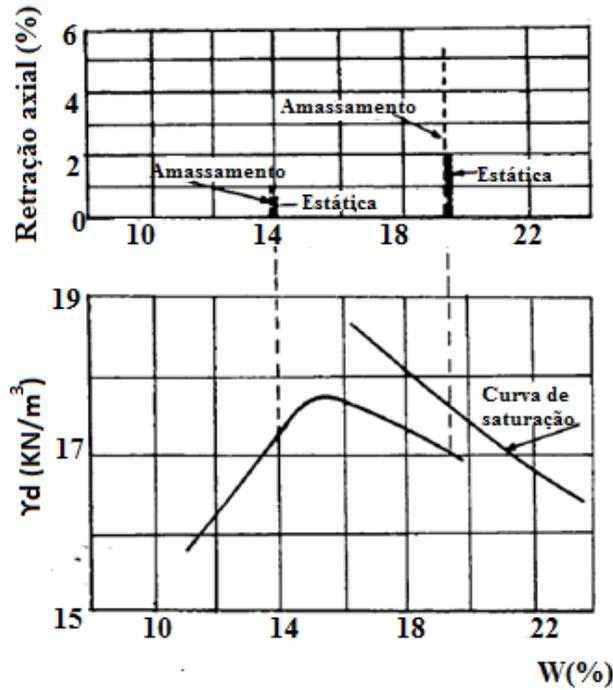


Figura 14- Influência do método de compactação na retração axial do "silte de Orly", Bouche 1967.

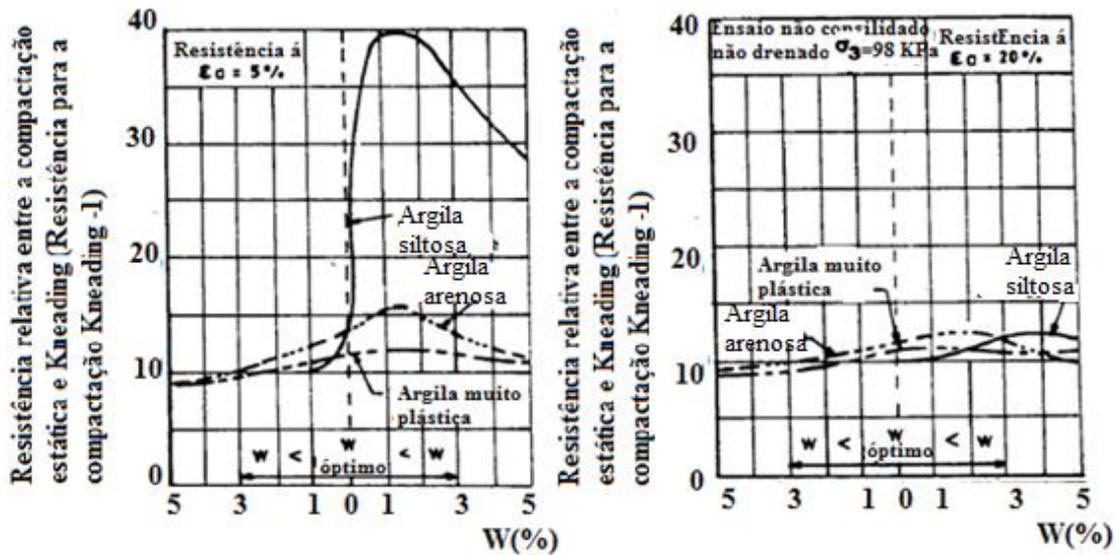


Figura 15- Influência do método de compactação sobre a resistência relativa de vários solos, Seed et Chan (1959).

## 2.2 OUTROS ESTUDOS REALIZADOS

Wang et al. (2011) estudaram a influência dos métodos de compactação no desenvolvimento da resistência ao corte num agregado britado bem graduado. Este estudo comparou os efeitos de dois métodos de compactação, respetivamente, a compactação por vibração e a compactação do tipo Proctor modificado, sobre as características de tensão-deformação e resistência ao corte do agregado. Os resultados deste estudo mostraram que as amostras compactadas pelo método de vibração possuem maior resistência de pico (no que diz respeito à resistência obtida no corte triaxial), maior módulo de elasticidade, e menor tensão de rotura nas amostras testadas pela compactação Proctor Modificado. Os autores afirmam também que, especificamente, a coesão, o ângulo de atrito, assim como a resistência ao corte das amostras, pelo método da compactação por vibração aumentaram em 38%, 2 graus e 10%, respetivamente, em comparação com as amostras testadas pela compactação Proctor Modificado. Em conclusão, o método de compactação por vibração, geralmente tem melhor desempenho do que o método de compactação Proctor modificado, devido a uma melhor distribuição da orientação das partículas (Wang Long et al., 2011).

Segundo Knei *et al.* (2006) num estudo sobre a influência de vários métodos de compactação, no desempenho de um cimento de solo estabilizado, concluiu-se que a compactação dinâmica, num solo com cerca de 8% de cimento, parece dar melhor desempenho sobre o solo utilizado, comparativamente com os restantes métodos utilizados. Este estudo incidiu sobre características como, resistência à compressão, retração e resistência à água pelos vários métodos, nomeadamente, compactação através da aplicação de uma carga estática, compactação dinâmica obtida através de uma queda de um peso, e compactação estática juntamente com a compactação por vibração.

Seed e Chan (1965) estudaram a influência da técnica de compactação aplicada no que diz respeito à resistência, expansividade e compressibilidade. Concluíram que, a partir dos ensaios realizados com distintos tipos de energia de compactação, a deformação devida ao corte e, conseqüentemente, o grau de dispersão aumenta da seguinte forma: compactação estática, vibratória de impacto e por pisoteamento.

Werk (2000) estudou a influência dos métodos de compactação no comportamento resiliente dos solos. O autor utilizou para a pesquisa uma argila e um solo residual de arenito. Estes solos foram sujeitos à compactação dinâmica ou por impacto, à compactação estática ou por pressão e à compactação por pisoteamento ou amassamento. Werk (2000) concluiu que o melhor desempenho que se pode alcançar de um determinado método de compactação está relacionado com o tipo de solo e o teor em água. Além disso, o autor verificou que, independentemente, do método de compactação, a argila apresentou maiores valores de sucção do que o arenito.

Dantas (2013) comparou dois métodos de compactação, por impacto e por amassamento, representados pelo ensaio Proctor e pelo compactador giratório Superpave, respetivamente. Este estudo incidiu sobre um solo argiloso. O autor concluiu que os ensaios de compactação pelo método Proctor obtiveram maiores valores para a massa específica aparente seca máxima do que o método compactador giratório Superpave. Provavelmente, os resultados obtidos foram influenciados pelo número de camadas das amostras, pois no Proctor foram moldadas 3 ou 5 camadas e no compactador giratório Superpave as amostras apenas foram moldadas numa única camada (Dantas, 2013).

Carvalho *et al.* 1987 estudou a reconstituição de provetes em laboratório, tendo como principal objetivo encontrar uma técnica de compactação, de forma a alcançar uma mistura homogénea, tendo em conta a reprodução do comportamento mecânico do solo tão perto quanto possível do material compactado no local. Parece que nenhuma teoria de compactação, relatada na bibliografia deste estudo, é inteiramente satisfatória, mas cada uma traz elemento para melhorar a compreensão dos efeitos da compactação. O autor verificou também que a técnica de preparação dos provetes tem uma influência significativa sobre a homogeneidade do peso volúmico seco. No caso da compactação estática, foi demonstrado que o atrito do molde do solo é responsável pela falta de homogeneidade das densidades.

### **2.3 SÍNTESE**

A compactação dos solos permite diminuir o índice de vazios e conseqüentemente, aumentar o peso volúmico seco. O teor em água define uma maior ou menor eficiência

do processo de compactação, que por sua vez depende do efeito de atrito entre as partículas e a água e do efeito de sucção. Segundo o ensaio de compactação Proctor, existe um teor em água ótimo que se define como a relação ideal entre as partículas, a água e o ar. Quanto mais densos os solos se apresentarem após a compactação mais resistentes serão, o que depende de fatores como o tipo de solo, teor em água, energia de compactação e técnica de compactação. Conforme a compactação seja realizada no ramo seco (abaixo do teor em água ótimo) ou no ramo húmido (acima do teor em água ótimo) da curva de compactação que define o solo, determinará a sua estrutura, ou seja, a redistribuição e orientação das partículas dos solos, que se afirma como um dos fatores mais importantes para definir o comportamento do solo como material estrutural (resistência, compressibilidade, permeabilidade e deformabilidade). No entanto, Bell (1971) afirma que solos com a mesma densidade podem apresentar diferentes comportamentos se compactados por diferentes técnicas.

No caso do método estático (e.g., compactação Harvard) numa argila, Lambe (1958) conclui que para iguais energias de compactação e peso volúmico a estrutura do solo argiloso é diferente conforme o teor em água da amostra e, acrescenta, que no ramo seco este método pouco afeta a estrutura do solo, originando estruturas flocluladas. Já no ramo, húmido, parece que o método estático já tem influência na estrutura do solo e por isso, origina estruturas dispersas. Se o teor em água for o mesmo, quanto maior a energia de compactação aplicada maior é o grau de dispersão entre as partículas, o que segundo os autores Lambe e Witman (1979), um solo que apresente uma estrutura dispersa, normalmente, para o mesmo teor em água tem menor resistência, maior deformabilidade e menor permeabilidade. Cruz (1967) afirma que a compactação estática é que induz menores tensões de corte.

No caso da compactação dinâmica ou de impacto (e.g., compactação Proctor), a energia de compactação varia se a altura da queda do peso, o nº de vezes e a espessura da camada forem diferentes, que por sua vez implica uma estrutura do solo distinta.

Assim, parece claro afirmar que muitos são os fatores que podem influenciar a estrutura do solo, e que a técnica de compactação empregada devido às várias diferenças na forma como se aplicam a energia de compactação, a intensidade da aplicação dessa mesma energia, influência de forma direta a estrutura do solo e, conseqüentemente, o

comportamento estrutural do solo. Como afirma Lambe (1958a, citado por Carvalho *et al.*, 1987) a evolução da orientação das partículas (estrutura do solo) depende da intensidade da deformação por corte, ela própria em função do teor em água, energia de compactação aplicada e o método de compactação aplicado.



### 3 MATERIAIS, TÉCNICAS DE COMPACTAÇÃO E METODOLOGIAS

#### 3.1 SOLOS

Neste estudo, são utilizados como solos para teste, um solo residual granítico de Guimarães (Soares, 2013) recolhido nas imediações do Campos de Azurém da Universidade do Minho (situado em Guimarães) e uma argila de Odemira (Silva,2013).

Relativamente ao solo residual granítico, Soares (2013) apresentou a granulometria do solo (figura 16a), o índice de plasticidade apresentado na tabela 1, a curva de compactação do Proctor leve (figura 17a) e um quadro resumo das características deste solo (tabela 1). Este solo, segundo ASTM é classificado como SW, ou seja, areia bem graduada.

Silva (2013), apresentou a curva granulométrica da argila de Odemira (S5) (figura 16b), a curva de compactação representada na figura 17b e uma tabela resumo das características de compactação referentes a este solo (tabela 2). Este solo classifica-se como uma argila magra (CL) segundo a classificação ASTM.

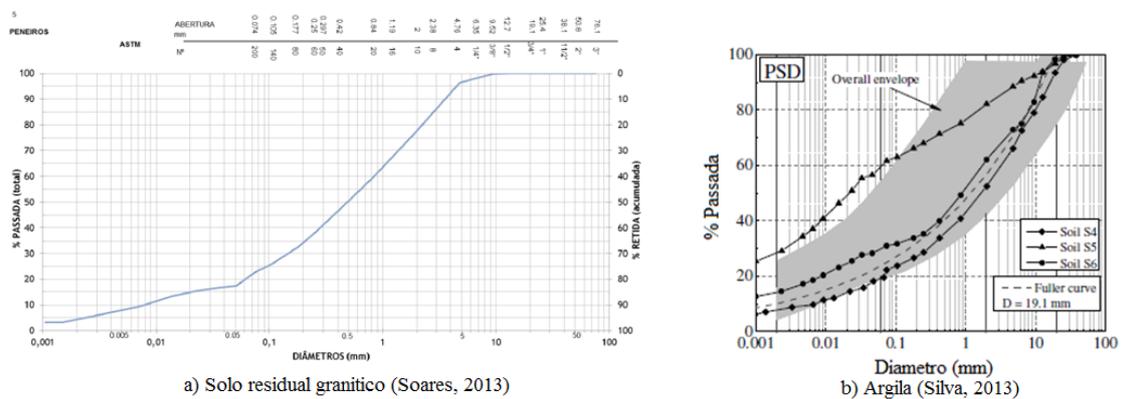
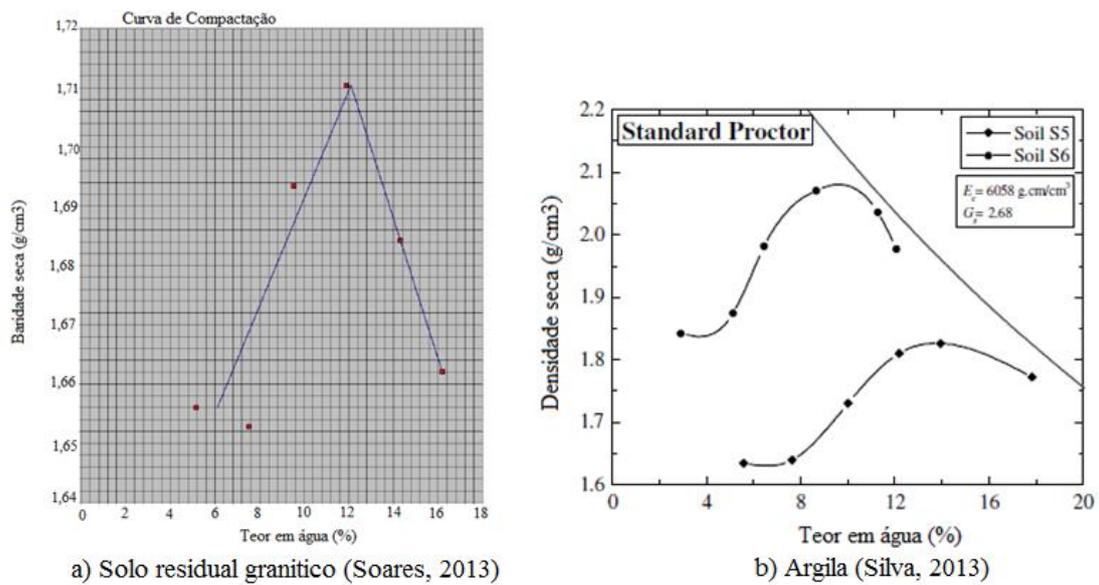


Figura 16- Curva granulométrica dos solos utilizados para o caso de estudo



a) Solo residual granítico (Soares, 2013)

b) Argila (Silva, 2013)

Figura 17- Curva de compactação dos solos utilizados para o caso de estudo

Tabela 1- Propriedades de compactação do solo residual granítico de Guimarães (Soares, 2013)

W <sub>P</sub> (%)	-
W <sub>L</sub> (%)	28,0
Teor de humidade óptimo (%)	12,3
Proctor pesado	
Baridade seca máxima (kN/m <sup>3</sup> )	18,5
Proctor pesado	
Teor de humidade óptimo (%)	12,1
Proctor leve	
Baridade seca máxima (kN/m <sup>3</sup> )	17,1
Proctor leve	
D <sub>10</sub> (mm)	0,007
D <sub>30</sub> (mm)	0,105
D <sub>60</sub> (mm)	0,850
Cu	121,43
Cc	1,89

Tabela 2- Propriedades de compactação da argila de Odemira (Silva, 2013)

Solo	$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	W(%)	G <sub>s</sub>
S5	1.83	13.4	2.68
S6	2.10	10.1	2.68

Assim, no caso de estudo as características dos solos utilizadas foram apenas o teor em água ótimo de cada um dos solos, referente a compactação Proctor leve e a densidade das partículas sólidas, apresentado na tabela 3.

Tabela 3- Características dos solos utilizadas para o caso de estudo

Tipo de solo	$\omega_{\text{ótimo}}$	G
Solo residual granítico de Guimarães	12,1 %	2,62
Argila de Odemira	13,4 %	2,68

Aquando a revisão bibliográfica, verificou-se que um dos fatores que influencia o processo de compactação é o tipo de solo. Assim, a escolha dos solos, teve em conta o facto de um ser um solo coerente (argila) e outro ser um solo incoerente (solo residual granítico), permitindo perceber a influência das várias técnicas de compactação laboratoriais, no caso de dois solos completamente distintos.

### 3.2 TÉCNICAS DE COMPACTAÇÃO

Segundo vários autores, referidos nos estudos anteriormente descritos no capítulo 2, afirmam que outro dos fatores que influencia a compactação dos solos, é a técnica de compactação utilizada e, conseqüentemente, o equipamento utilizado.

Tendo por base as afirmações feitas por todos os autores, relativos à influência da técnica de construção de amostras reconstruídas, e atendendo a quais possuem maior implementação nos laboratórios de Geotecnia, os métodos que foram utilizados para perceber a sua influência em relação à deformabilidade e resistência mecânica, na reconstrução dos provetes em laboratório, foram:

- Compactação Proctor
- Compactação com Martelo Vibratório
- Compactação Manual
- Compactação Harvard

### 3.3 EQUIPAMENTOS

Para a realização dos ensaios foram selecionados dois equipamentos distintos, nomeadamente, a caixa de corte direto (figura 18a) realizado conforme a norma BSI (1990b) que permite avaliar a resistência mecânica do solo; e o edómetro (figura 18b) realizado tendo em conta a norma BSI (1990a) que permite avaliar a deformabilidade do mesmo.

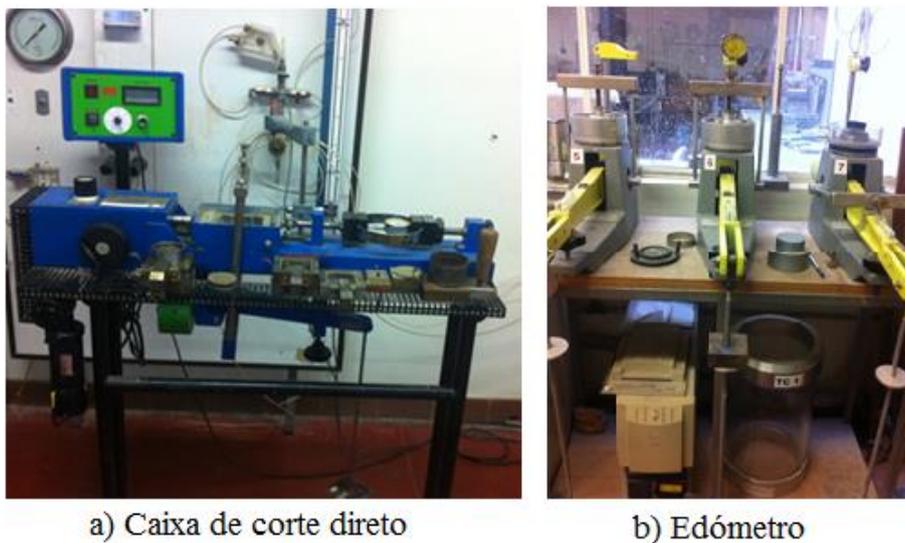


Figura 18- Equipamentos disponíveis no laboratório de Geotecnia (DEC) da Universidade do Minho

O molde utilizado para as técnicas compactação tipo Proctor, compactação Harvard e compactação manual, foi o molde pequeno Proctor com uma capacidade de  $953.18 \text{ cm}^3$  (figura 19a); e para a compactação com o martelo vibratório foi utilizado o molde grande Proctor com um volume igual a  $2116 \text{ cm}^3$  (figura 19b) pois a base do martelo vibratório era demasiado grande para compactar no molde pequeno Proctor.

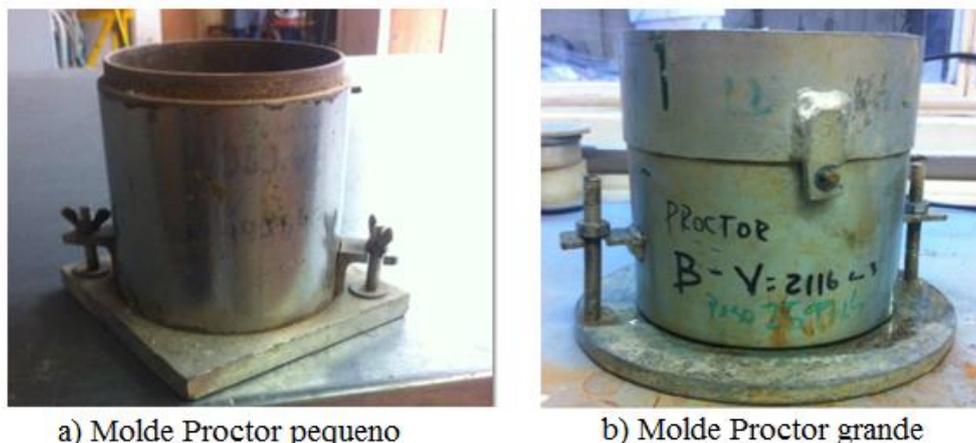


Figura 19- Moldes utilizados para realizar a compactação dos solos

Foram também utilizados equipamentos relativos a cada técnica de compactação. Para a compactação Proctor foi usado o pilão leve para compactar o solo, tal como mostra a figura 20a.

Para a compactação com o martelo vibratório utilizou-se um martelo vibratório Kango 638 representado na figura 20b, com peso igual a 10,346 kg e com diâmetro da base de 145 mm. A frequência usada para a compactação foi de 60 Hz.

A compactação manual foi realizada utilizando um instrumento de madeira para compactar representada na figura 20c, com um diâmetro de 37,49 mm e peso igual a 103,1 g.

A compactação Harvard efetuou-se através de uma prensa e de macaco hidráulico apresentado nas figuras 20d e 20f, medindo a força exercida com recurso a um anel de 30 KN (figura 20e). No caso da areia, para todas as amostras foi necessário uma carga de aproximadamente 343 Kg e nas amostras de argila uma carga de 229 Kg.



Figura 20- Equipamentos utilizados e disponíveis no laboratório de Geotecnia da Universidade do Minho, na realização de cada técnica de compactação em estudo

### 3.4 METODOLOGIA

#### 3.4.1 Peso volúmico natural e seco

Para os dois tipos de solo (solo residual granítico e argila), foi determinado, inicialmente, o peso volúmico natural e seco através da compactação Proctor leve em molde pequeno de modo a verificar os valores obtidos pelos autores Soares (2013) e Silva (2013), respetivamente. Posto isto, os valores do peso volúmico natural e seco usados para este caso de estudo, são os obtidos neste estudo. Este processo permite que se construam amostras todas idênticas, com um peso volúmico idêntico, para cada um

dos materiais. Com isto, consegue-se uma homogeneização das amostras e uma melhor amostragem para estudo, para a comparação dos resultados dos ensaios, de cada técnica de compactação utilizada.

Assim, para a determinação do peso volúmico natural dos solos, realizou-se o seguinte procedimento:

1. A amostra de solo (tal como foi recebida de campo), esteve exposta ao ar de modo a proceder à secagem, naturalmente (figura 21a);
2. Recolheu-se uma quantidade aleatória de solo e separou-se em tabuleiros (figura 21b);
3. Colocou-se os tabuleiros com o solo, dentro da estufa por um período de 24 horas, para retirar toda a água existente no solo (figura 21b);
4. Após a secagem na estufa, os solos foram passados no peneiro #4 ASTM (4.8 mm) (figura 21c);
5. Pesou-se 2,5 kg de cada solo, depois de peneirado (figura 21d);
6. Misturou-se a quantidade de água correspondente ao teor ótimo de cada material nos 2,5 kg de solo (figuras 21e e 21f);
7. Dividiu-se a mistura em três frações idênticas (figura 21g);
8. Compactou-se cada uma das frações no molde pequeno, assente na base rígida, com 25 pancadas do pilão leve, distribuídas uniformemente sobre a superfície. Em cada camada compactada, foi feita a escarificação para promover maior entre as camadas (figuras 21he a 21i);
9. Colocou-se o anel para retirar a amostra, pesou-se e calculou-se o peso volúmico natural de cada solo (figura 21l).



Figura 21- Procedimento seguido para determinação do peso volúmico através da compactação Proctor leve

Para o cálculo do peso volúmico natural dividiu-se o peso do solo, inserido no molde pequeno, pelo volume do molde. Para obtenção do peso volúmico seco aplicou-se a seguinte expressão:

$$\gamma_{seco} = \frac{\gamma_{natural}}{1 + \omega} \quad (1)$$

Os resultados obtidos foram os seguintes:

- Solo residual granítico

$$\gamma_{natural} = 19,62 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{seco} = 17.50 \text{ kN/m}^3;$$

- Argila

$$\gamma_{natural} = 19.92 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{seco} = 17.57 \text{ kN/m}^3$$

Tendo isto, a preparação das amostras para ensaio foram construídas tendo em conta este peso volúmico obtido, para cada solo, dando apenas uma margem de erro de 10%

entre as amostras. Ou seja, todas as amostras para ensaio têm o peso volúmico entre os seguintes valores:

- Solo residual granítico

$$18,64 \text{ KN/m}^3 \leq \gamma_{natural} \leq 20,60 \text{ KN/m}^3$$

- Argila

$$18,93 \text{ KN/m}^3 \leq \gamma_{natural} \leq 20,92 \text{ KN/m}^3$$

### 3.4.2 Preparação das amostras

De forma a respeitar o peso volúmico natural calculado anteriormente, para a construção das amostras para estudo, calculou-se a quantidade de solo necessário por camada e a altura que o solo (depois de compactado) deveria alcançar, em cada um dos moldes usados (pequeno e grande).

No processo da construção das amostras, optou-se por apenas compactar uma camada de solo e retirar a amostra dessa camada, isto porque se verificou que compactar três camadas de solo ou compactar uma camada de solo não interferia no peso volúmico do solo que se pretendia alcançar, pois a amostra retirada apenas era da última camada. Por isso, achou-se plausível esta alteração.

Assim, foram realizadas as seguintes tarefas para preparação das amostras, ensaiadas na caixa de corte direto, para cada uma das técnicas de compactação:

1. A amostra de solo (tal como foi recebida de campo), esteve exposta ao ar de modo a proceder à secagem, naturalmente (figura 22a);
2. Recolheu-se uma quantidade aleatória de solo e separou-se em tabuleiros (figura 22a);
3. Colocou-se os tabuleiros com o solo, dentro da estufa por um período de 24 horas, para retirar toda a água existente no solo (figura 23b);
4. Após a secagem na estufa, os solos foram passados no peneiro #4 ASTM (4.8 mm) (figura 22c);
5. Pesagem da quantidade de solo necessária para compactar três camadas de solo, três camadas essas que servem para retirar três amostras (figura 22d);

6. Mistura da água com o solo correspondente ao teor em água ótimo para essa quantidade de solo (figura 22e);
7. Colocação da mistura dentro de um saco plástico, devidamente lacrado para que não haja evaporação da água (figura 22f);
8. Armazenamento do saco plástico na camara húmida durante 24 horas para que se processe a uniformização da mistura;
9. Após uniformização da mistura, retirada de uma pequena quantidade de solo para verificação do teor em água (figura 22g);
10. Pesagem da quantidade de mistura referente a cada uma das camadas (figura 22h);
11. Compactação da camada de solo com a devida técnica de compactação (figura 22i);
12. Retirada da amostra do solo e colocada na caixa de corte para ensaio (figura 22j).

Para a obtenção das amostras para ensaiar no edómetro, as tarefas são idênticas às seguidas para a caixa de corte, de forma a obter o mesmo teor em água em todas as amostras, independentemente da técnica de compactação utilizada. Assim, consegue-se uma comparação de resultados mais eficiente. No entanto, na compactação com o martelo vibratório, para ensaio da amostra no edómetro, o teor em água é diferente das restantes técnicas, ainda que próximo, pois este foi repetido e portanto, voltou-se a preparar o solo de acordo com o procedimento anterior, exceto no ponto 5, pois apenas se fez a pesagem de solo correspondente a uma camada.



Figura 22- Processo seguido para preparação das amostras para ensaio

A figura 22 mostra as tarefas realizadas para a preparação das amostras descritas anteriormente, e a figura 23 mostra o processo seguido para todas as técnicas de compactação, para cada tipo de solo em estudo, no que diz respeito à compactação de uma camada de solo e extração da amostra para ensaio:



Figura 23- Processo de compactação de uma camada de solo

- (1) Introdução de uma parte do material no fundo do molde Proctor (pequeno ou grande);
- (2) Colocação do anel para retirar a amostra;
- (3) Inclusão do restante material no molde por cima do material e do anel já incluídos (1) e (2).

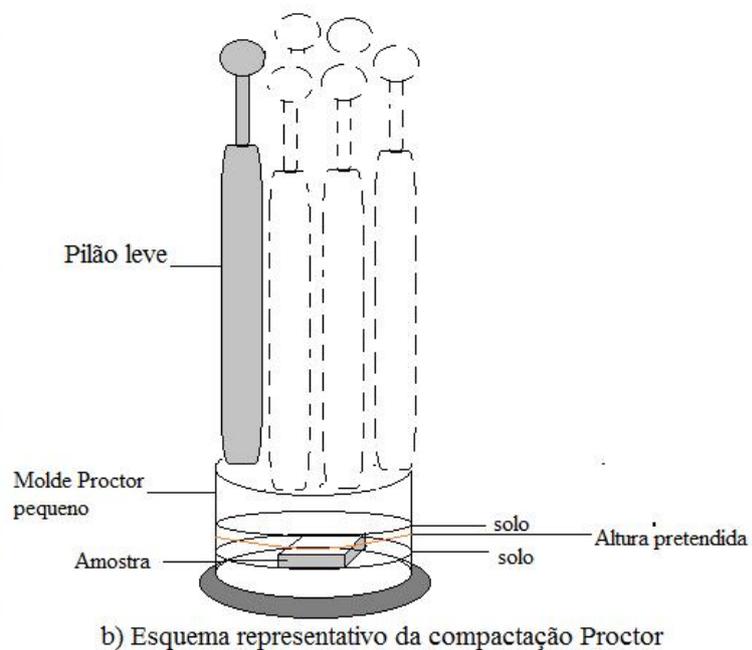
Posto isto, compactou-se a camada de solo com a respetiva técnica de compactação e retirou-se a amostra.

### 3.4.3 Compactação Proctor

A compactação tipo Proctor (figura 24) foi realizada, num molde pequeno, empregando um pilão leve (figura 20a), conforme a norma LNEC E-197. Aplicou-se 25 pancadas, quer para o solo residual granítico quer para a argila, na camada que consistia uma amostra.



a) Compactação Proctor



b) Esquema representativo da compactação Proctor

Figura 24- Compactação Proctor

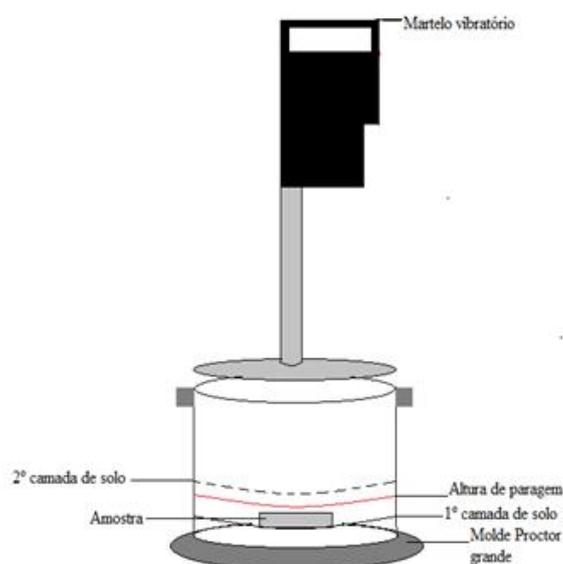
Neste tipo de compactação foram confeccionadas quatro amostras de solo residual granítico e quatro amostras de argila, onde três dessas amostras de cada um dos solos em estudo foram ensaiadas na caixa de corte e uma no edómetro.

### 3.4.4 Compactação com martelo vibratório

A compactação com o Martelo Vibratório (figura 25) foi realizada através de um martelo vibratório (figura 20b), conforme a norma BSI (1990d), no molde grande (figura 19b), sendo que a paragem da aplicação da força era ditada quando o solo atingia a altura para a qual se obtinha o peso volúmico do solo entre os valores acima mencionados, tal como representa o esquema da figura 25.



a) Compactação com martelo vibratório



b) Esquema representativo da compactação com o martelo vibratório

Figura 25- Compactação com o martelo vibratório

Tal como nas técnicas anteriores, foram realizadas quatro amostras, para ambos os solos, três de cada um dos solos para ensaio na caixa de corte e uma para ensaio no edómetro.

### 3.4.5 Compactação manual

A compactação manual (figura 26) foi realizada através de um instrumento em madeira (figura 20c), conforme o procedimento interno do laboratório de Geotecnia (DEC) da Universidade do Minho, no molde pequeno (figura 19a), no qual se aplica a força

manual de modo a atingir-se a altura para a qual se obtinha o peso volúmico do solo pretendido.

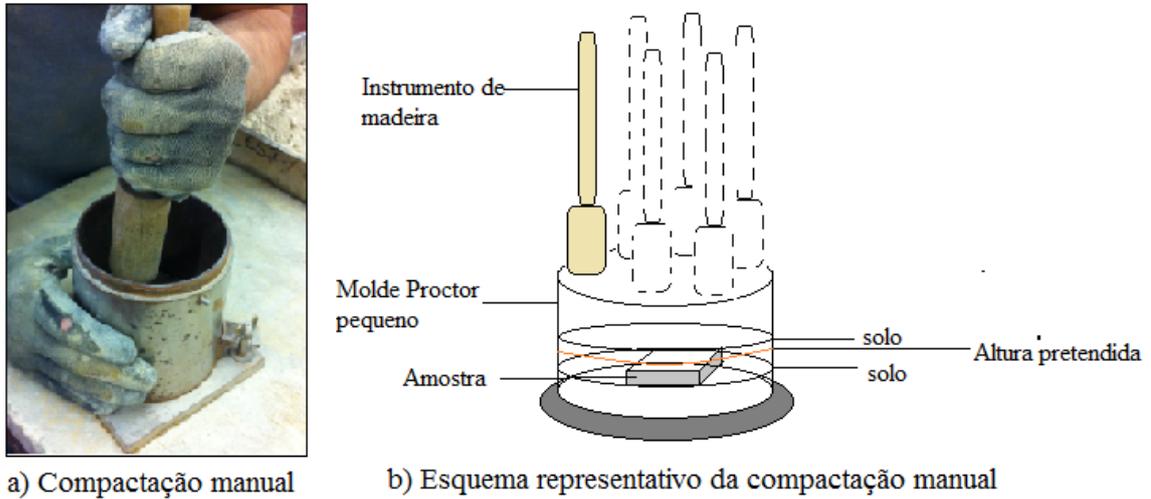


Figura 26- Compactação manual

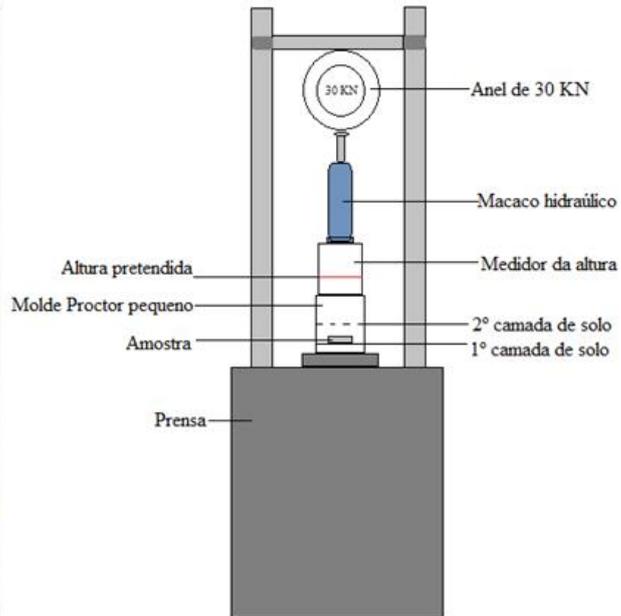
Para esta técnica de compactação foram realizadas quatro amostras, para ambos os solos (solo residual granítico e argila), três de cada um dos solos para ensaio na caixa de corte e uma para ensaio no edómetro.

### 3.4.6 Compactação Harvard

A compactação Harvard (figura 27) foi realizada, tendo em conta a norma ASTM (1970, apud Head 2006), com recurso a uma prensa (figura 20d), um anel de 30 KN (figura 20e) e uma macaco hidráulico (figura 20f) sendo compactada num molde pequeno (figura 19a). O controlo da compactação da camada de solo foi feito através da altura que correspondia ao peso volúmico do solo pretendido. Quando atingida essa altura, parava-se a aplicação da força, e anotava-se a máxima força exercida para a compactação da camada, ditada pelo anel.



a) Compactação Harvard



b) Esquema representativo da compactação Harvard

Figura 27- Compactação Harvard

Foram construídas quatro amostras para cada um dos solos em estudo, três de cada um dos solos para ensaio na caixa de corte e uma para ensaio no edómetro.

### 3.4.7 Ensaio de corte direto

O ensaio de corte direto foi realizado de acordo com a norma BSI (1990b). O tipo de ensaio realizado foi consolidado-drenado, pelo que inicialmente, se procedeu a consolidação primária de cada amostra, permitindo calcular a velocidade de consolidação de cada solo.

Para calcular a velocidade de consolidação das amostras aplicou-se a seguinte expressão matemática:

$$v = \frac{0,2 \times l}{12,7[\sqrt{t}]^2} \quad (2)$$

Após a consolidação primária da amostra, procedeu-se ao ensaio de corte direto. A caixa de corte é constituída por uma caixa metálica que se divide em duas partes iguais. A amostra de solo foi inserida na caixa e aplicou-se uma força vertical  $N$  à amostra,

impondo-se, seguidamente, uma força horizontal crescente (velocidade de corte, obtida através da consolidação primária) na metade superior da caixa o que provoca o seu deslocamento em relação à metade inferior (figura 28). Desta forma, foi imposta a superfície de rotura sendo processada ao longo de um plano horizontal.

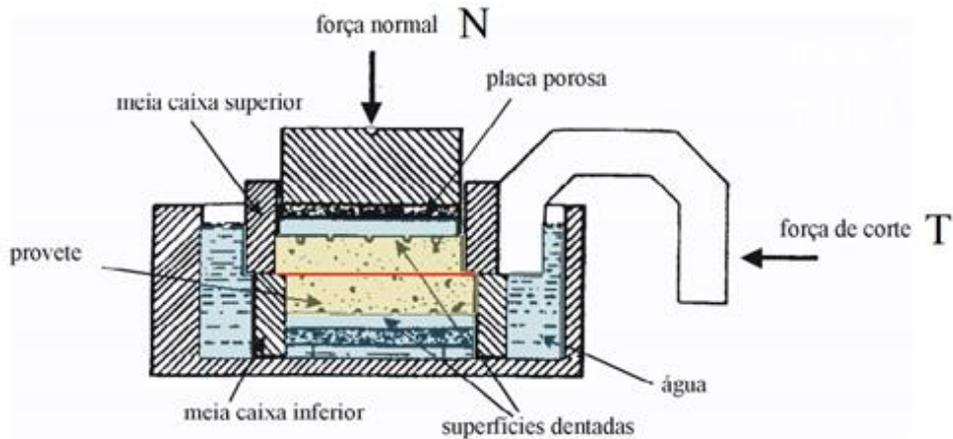


Figura 28- Esquema representativo da caixa de corte.

O ensaio realizou-se sob condições de deformação controladas, pois assim é possível obter a resistência de pico e de rotura do solo em estudo. Considerou-se que é atingida a rotura de solo quando o solo não consegue resistir a qualquer acréscimo de carga horizontal, ou seja, quando à estabilização da carga exercida. Neste ensaio os deslocamentos horizontais e verticais foram medidos com recurso a transdutores resistivos e as forças horizontal e vertical recorreu-se a células de carga.

Na caixa de corte direto, realizaram-se três ensaios, cada um com uma determinada força vertical (força normal) (tabela 4) e determinou-se a resistência associada a cada um destes ensaios. Cada um destes três ensaios, foram realizados para cada técnica de compactação em estudo, para cada um dos solos escolhidos. As amostras para a realização destes ensaios, em cada técnica de compactação, foram realizadas com o mesmo teor em água em cada um dos solos. No total, foram construídas 24 amostras para ensaio na caixa de corte direto como apresentam as tabelas 5 e 6.

Tabela 4- Força vertical (N) aplicada a cada uma das amostras para o ensaio de corte direto

<b>Amostra</b>	<b>Carga aplicada (kg)</b>	<b>Tensão aplicada (kPa)</b>
1	2	51,774
2	4	103,548
3	8	207,097

Tabela 5- Designação das amostras de solo residual granítico construídas para ensaio na caixa de corte

<b>Tipo de solo</b>	<b>Técnica de compactação</b>	<b>Amostra</b>	<b>Designação da amostra</b>
Residual granítico	Proctor	1	SP2
		2	SP4
		3	SP8
	Martelo vibratório	1	SMV2
		2	SMV4
		3	SMV8
	Manual	1	SM2
		2	SM4
		3	SM8
	Harvard	1	SH2
		2	SH4
		3	SH8

Tabela 6- Designação das amostras de argila construídas para ensaio na caixa de corte

<b>Tipo de solo</b>	<b>Técnica de compactação</b>	<b>Amostra</b>	<b>Designação da amostra</b>
Argila	Proctor	1	AP2
		2	AP4
		3	AP8
	Martelo vibratório	1	AMV2
		2	AMV4
		3	AMV8
	Manual	1	AM2
		2	AM4
		3	AM8
	Harvard	1	AH2
		2	AH4
		3	AH8

### 3.4.8 Ensaio edométrico

Para o ensaio edométrico foi realizada uma amostra para cada técnica de compactação, com o mesmo teor em água, de cada tipo de solo em estudo (areia e argila), exceto no caso do martelo vibratório na argila, como já foi mencionado anteriormente.

As amostras de solo têm formato cilíndrico com dimensões de 24 mm de espessura e 64 mm de diâmetro. O esquema representado na figura 29 mostra as condições em que se realizaram os ensaios edométricos.

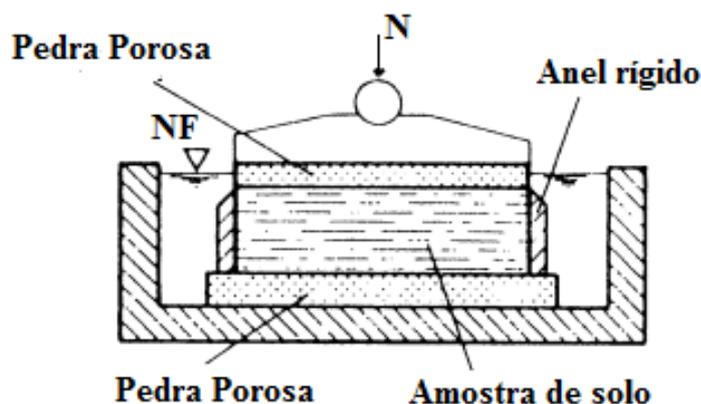


Figura 29- Corte da célula edométrica

Assim, após a colocação da amostra no edômetro esta foi submetida a carregamentos progressivos, através de um sistema de alavancas e pesos, onde se respeitou as seguintes condições:

- No caso do solo argiloso, cada carregamento foi mantido por um período de 24 horas, durante o qual se fizeram as leituras da deformação vertical ao longo do tempo (0.1min; 0.25 min; 0.5 min; 1min; 2 min; 4 min; 8 min; 15 min; 30 min; 60 min; 120 min; 240 min; 480 min; 1140 min);
- No caso do solo residual, a deformação vertical é instantânea e portanto, não foi feita a leitura ao longo do tempo. Apenas se aplicou o carregamento, deixou-se estabilizar e apontou-se a leitura.
- Aplicou-se para os dois tipos de solo, para cada amostra, sete patamares de carga (sem efetuar nenhuma descarga);
- No caso da argila depois de aplicados os sete carregamentos nas amostras foram realizadas duas descargas a qual se fizeram ao longo do tempo, por um período de 4 horas (tempo necessário para a estabilização): 0.1min; 0.25 min; 0.5 min; 1min; 2 min; 4 min; 8 min; 15 min; 30 min; 60 min; 120 min; 240 min.

No solo residual granítico, após aplicação dos sete patamares de carga, foram realizadas igualmente duas descargas, mas neste caso, a leitura foi feita instantaneamente.

Os patamares de carga assim como as descargas feitas foram aplicadas consoante mostra a tabela 7.

Tabela 7- Patamares de carga e descargas feitas no ensaio edométrico em cada uma das amostras realizadas.

<b>Patamar de Carga</b>	<b>Carga aplicada (kg)</b>	<b>Tensão aplicada (kPa)</b>
1	5	178,29
2	10	356,89
3	15,969	569,44
4	25,969	926,02
5	33,969	1211,29
6	43,029	1534,36
7	52,919	1887,03

<b>Descargas</b>	<b>Carga retirada (kg)</b>	<b>Tensão retirada (kPa)</b>
1	9,890	352,67
2	9,060	323,07

Através do ensaio edométrico foi possível calcular o assentamento do solo ao longo do tempo, consoante os carregamentos e descargas feitas em cada solo. Com estes valores é possível obter:

- Uma curva ( $\delta$ -log t) por cada patamar de carga ou descarga aplicados ao qual permite o cálculo do valor do tempo de consolidação- coeficiente de consolidação  $c_v$ , pelo método de Casagrande;
- O valor do índice de vazios inicial, assim como, o valor do mesmo correspondente a cada patamar de carga e descarga realizados, através da aplicação das seguintes expressões:

$$\rho = \frac{G \times \rho_w}{1 + e_0} \times (1 + \omega) \quad (3)$$

$$\delta = \frac{h_0}{1 + e_0} \times \Delta e \quad (4)$$

- Uma relação ( $\Delta e$ - $\sigma_v$ ) que permite estimar o valor da deformação numa camada de solo sob um determinado carregamento:

$$\Delta H = m_v \times \Delta \sigma_v \times h_0 \quad (5)$$

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0} \quad (6)$$

$$a_v = \left| \frac{\Delta e}{\Delta \sigma_v} \right| \quad (7)$$

- Uma relação ( $e$ -  $\log \sigma_v$ ) na qual se pode estimar o valor do coeficiente de recompressibilidade e compressibilidade do solo, respetivamente.

$$C_R \approx C_S = \left| \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma_v} \right| \quad (8)$$

$$C_C = \left| \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma_v} \right| \quad (9)$$

- O coeficiente de permeabilidade (K), aplicando a expressão:

$$c_v = \frac{K}{m_v \times \rho_w} \quad (10)$$

- O módulo edométrico do solo, calculando a expressão:

$$E_{\varepsilon_{h=0}} = \frac{1}{m_v} \quad (11)$$

Para o ensaio edométrico foram construídas 8 amostras como apresenta a tabela 8.

Tabela 8- Amostras construídas dos diferentes tipos de solo para o ensaio edométrico

<b>Tipo de solo</b>	<b>Técnica de compactação</b>	<b>Designação da amostra</b>
Residual granítico	Proctor	SP
	Martelo vibratório	SMV
	Manual	SM
	Harvard	SH
Argila	Proctor	AP
	Martelo vibratório	AMV
	Manual	AM
	Harvard	AH



## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1 CAIXA DE CORTE DIRETO

#### 4.1.1 Características iniciais das amostras

Na tabela 9 e 10 estão expostas as características iniciais de cada amostra construída com a devida técnica de compactação, no solo residual granítico e na argila, respetivamente.

Tabela 9- Características iniciais das amostras de solo residual granítico compactadas pelas várias técnicas de compactação em estudo

Técnica de compactação	Designação das amostras	$\gamma_{natural}$ ( $kN/m^3$ )	$\omega$ (%)	$e_0$
Proctor	SP2	19,62	8,5	0,438
	SP4	18,850	8,5	0,496
	SP8	18,915	8,5	0,491
Martelo vibratório	SMV2	18,874	8,4	0,493
	SMV4	18,982	8,4	0,485
	SMV8	19,475	8,4	0,447
Manual	SM2	18,549	8,1	0,515
	SM4	18,982	8,1	0,480
	SM8	18,730	8,1	0,500
Harvard	SH2	20,227	10,1	0,415
	SH4	19,041	10,1	0,503

SH8	19,378	10,1	0,477
-----	--------	------	-------

Tabela 10- Características iniciais das amostras de argila compactadas pelas várias técnicas de compactação em estudo

Técnica de compactação	Designação da amostra	$\gamma_{natural}$ ( $kN/m^3$ )	$\omega$ (%)	$e_0$
<b>Proctor</b>	AP2	20,860	9	0,394
	AP4	20,828	9	0,396
	AP8	20,786	9	0,399
<b>Martelo vibratório</b>	AMV2	20,678	8,3	0,398
	AMV4	20,644	8,3	0,400
	AMV8	20,798	8,3	0,389
<b>Manual</b>	AM2	20,747	7,52	0,383
	AM4	20,850	7,52	0,376
	AM8	20,846	7,52	0,376
<b>Harvard</b>	AH2	20,778	7,14	0,376
	AH4	20,810	7,14	0,374
	AH8	20,798	7,14	0,375

Como se observa nas tabelas anteriores, todas as amostras têm características iniciais idênticas, quer as amostras de solo residual granítico (tabela 7) quer as amostras de argila (tabela 8) e, percebe-se que, quanto maior for o peso volúmico da amostra menor é o índice de vazios da amostra o que significa que o solo se encontra mais compacto e por consequência, mais resistente. Esta semelhança entre as amostras ajuda na clarificação dos resultados para o caso de estudo.

### 4.1.2 Consolidação das amostras

A consolidação das amostras de solo residual granítico permitiu determinar a velocidade de corte, aplicando a equação 1 apresentada no capítulo 3. Assim, a velocidade de corte usada, para o caso do solo residual granítico, foi 0,056 m/s. Para o caso da argila, manteve-se a mesma velocidade usada para a areia. A figura 30 e 31 apresentam as curvas de consolidação do solo residual granítico e da argila, respetivamente, para cada uma das técnicas de compactação em estudo.

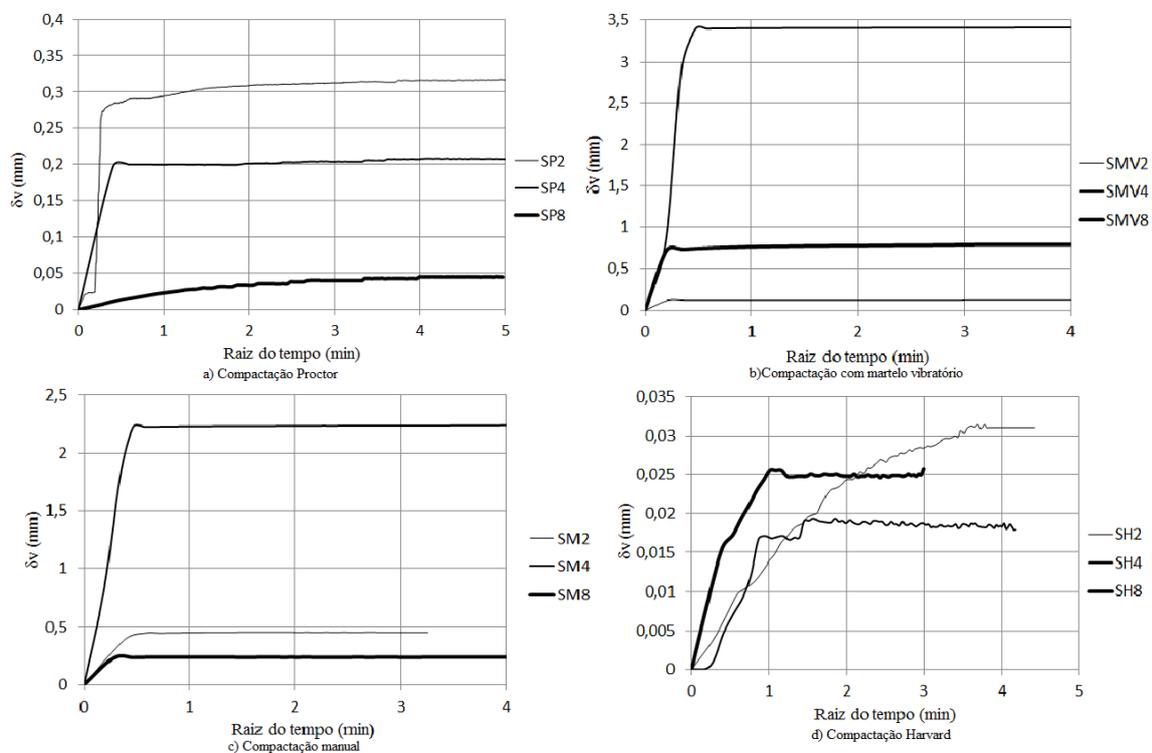


Figura 30- Consolidação das amostras de solo residual granítico construídas pelas diferentes técnicas (a,b,c,d)

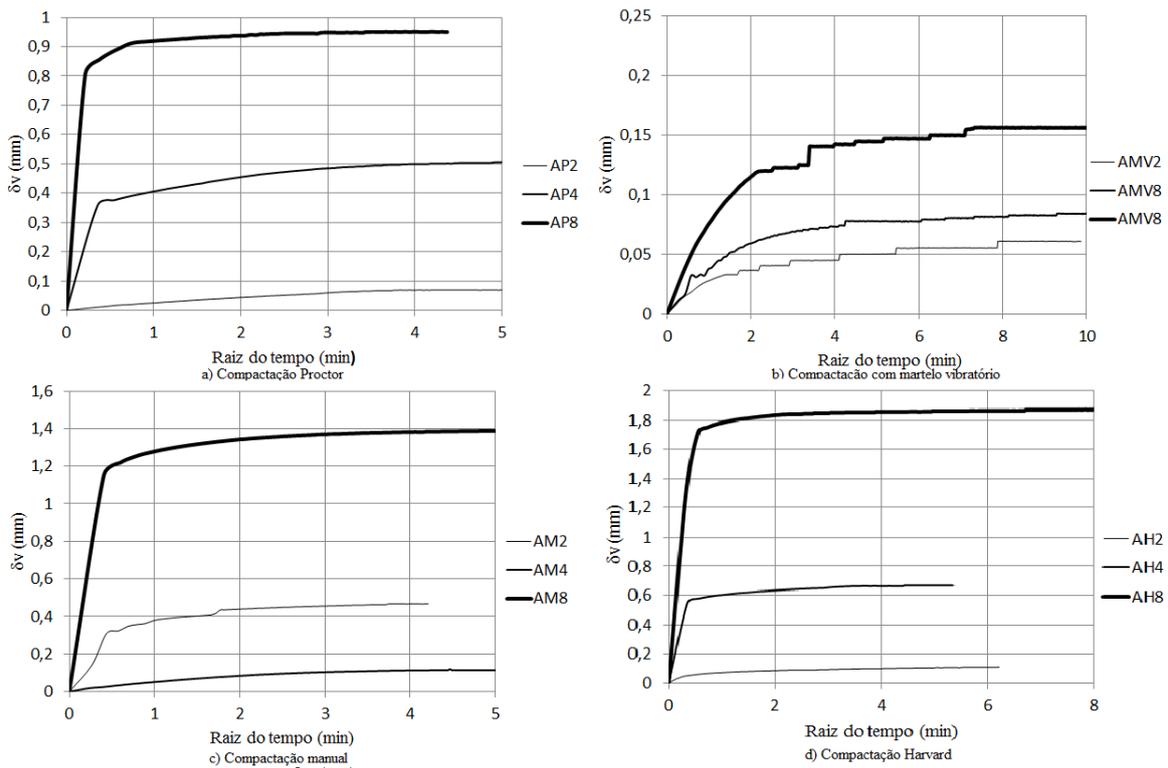


Figura 31- Consolidação das amostras de argila construídas pelas diferentes técnicas (a,b,c,d)

### 4.1.3 Evolução do deslocamento vertical em função do deslocamento horizontal

As figuras 32 e 33 apresentam a evolução do deslocamento vertical em função do deslocamento horizontal das várias amostras de solo residual granítico e argila, respetivamente, pelas diferentes técnicas de compactação em estudo. A relação apresentada permite perceber se a amostra foi bem compactada ou não através do seu comportamento contratante ou dilatante.

As amostras de solo residual granítico obtidas pelas diferentes técnicas de compactação, correspondentes a figura 32a, demonstraram um comportamento contratante na fase inicial de corte, mas á exceção da amostra compactada pelo martelo vibratório e manual, as restantes amostras começaram a dilatar após uma certa fase de corte da amostra.

O mesmo se verifica nas curvas apresentadas na figura 32b, relativamente ao solo residual granítico. Mas, ao contrário do que acontece nas amostras anteriormente analisadas, a compactação Harvard e a compactação Proctor é que apresentam um comportamento dilatante após ocorrer algum deslocamento horizontal (fase de corte).

Na figura 32c verifica-se que apenas a compactação manual apresenta um comportamento dilatante, apesar de inicialmente apresentar um comportamento contratante.

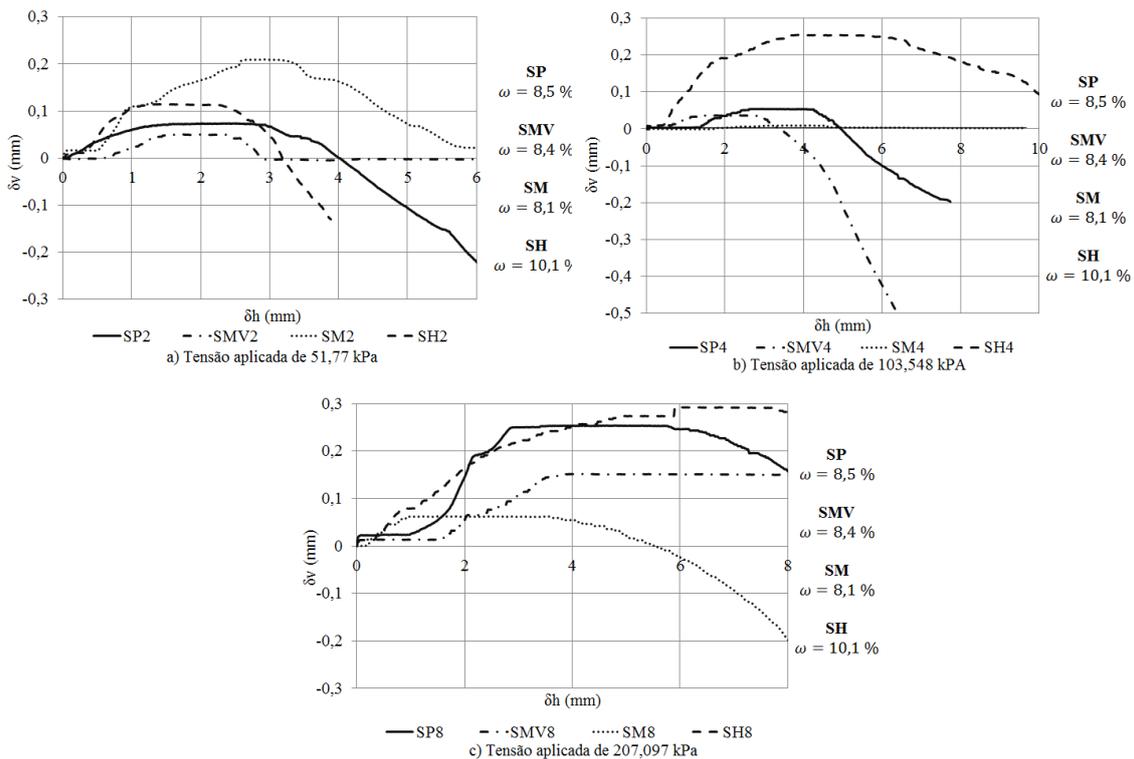


Figura 32- Evolução do deslocamento vertical em função do deslocamento horizontal das amostras de solo residual granítico, construídas pelas diferentes técnicas de compactação

No caso das amostras de argila, nas figuras 33a verifica-se um comportamento contratante de todas as amostras na fase inicial do corte, mostrando a compactação Proctor e a compactação Harvard um comportamento dilatante após algum período do ensaio.

A figura 33b e 32c são claras, mostrando que todas as amostras construídas pelas diferentes técnicas de compactação apresentaram comportamento contratante durante toda a fase de corte.

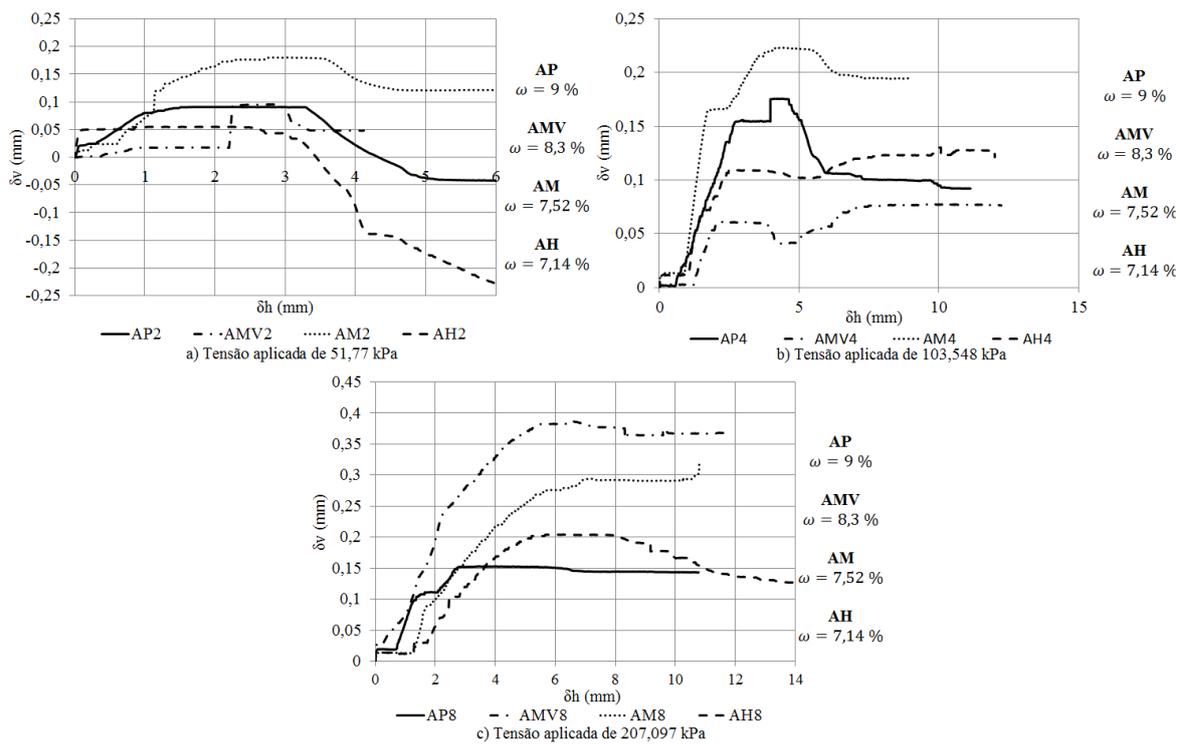


Figura 33- Evolução do deslocamento vertical em função do deslocamento horizontal das amostras de solo residual granítico, construídas pelas diferentes técnicas de compactação

Estes resultados permitem perceber se as amostras compactadas pelas diferentes técnicas estavam ou não bem compactadas como já tinha sido referido antes. Este critério é verificado consoante o seu comportamento contratante ou dilatante. Quando a amostra é contratante durante a fase de corte é porque ainda existe alguns vazios no solo e portanto, ele assenta (contraí). Quando a amostra apresenta comportamento dilatante durante a fase de corte é porque existe maior atrito entre as partículas, ou seja, o solo está mais compacto e é mais resistente, o que faz com que dilate quando sujeito ao corte.

Posto isto, é possível verificar que, no caso do solo residual granítico o comportamento das amostras, relativamente às diferentes técnicas aplicadas, o comportamento do solo quando sujeito ao corte é idêntico. Já no caso da argila, existe maior discrepância no comportamento das amostras compactadas pelas diferentes técnicas sugerindo que a técnica tem influência no comportamento do solo.

#### 4.1.4 Evolução da tensão de corte em função do deslocamento horizontal

As figuras 34 e 35 mostram a evolução da tensão de corte em função do deslocamento horizontal das amostras de solo residual granítico e da argila, respetivamente, compactadas pelas diferentes técnicas.

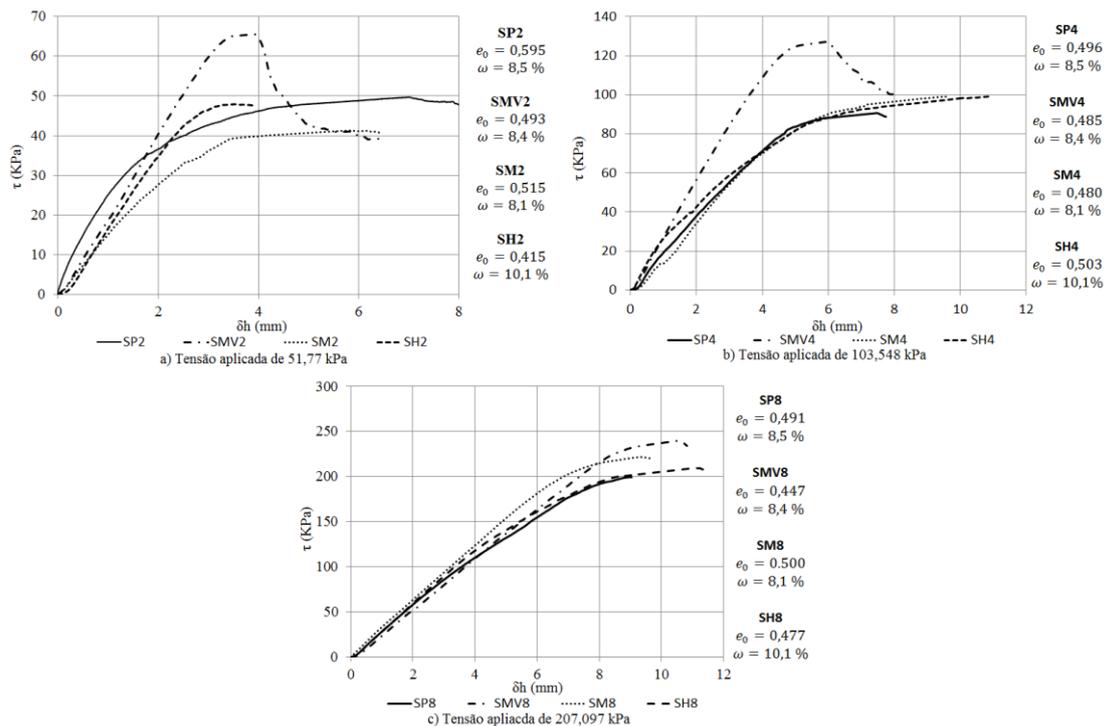


Figura 34- Evolução da tensão de corte em função do deslocamento horizontal, para cada uma das tensões aplicadas, nas amostras de solo residual granítico

No solo residual granítico (figura 34) a evolução da tensão de corte em função do deslocamento horizontal é semelhante entre as várias amostras compactadas pelas diferentes técnicas. Apenas a compactação com o martelo vibratório apresentou um comportamento diferente, pois a amostra apresenta uma resistência de pico o que sugere que ocorreu um imbricamento entre as partículas. No entanto, tende a igualar-se as restantes técnicas em valores residuais, o que implica que deixou de haver imbricamento das partículas.

De uma maneira geral, em termos de valores residuais (desprezando as resistências de pico atingidas pelo martelo vibratório) verifica-se que as amostras tem comportamento muito idêntico na evolução da tensão de corte em função do deslocamento horizontal.

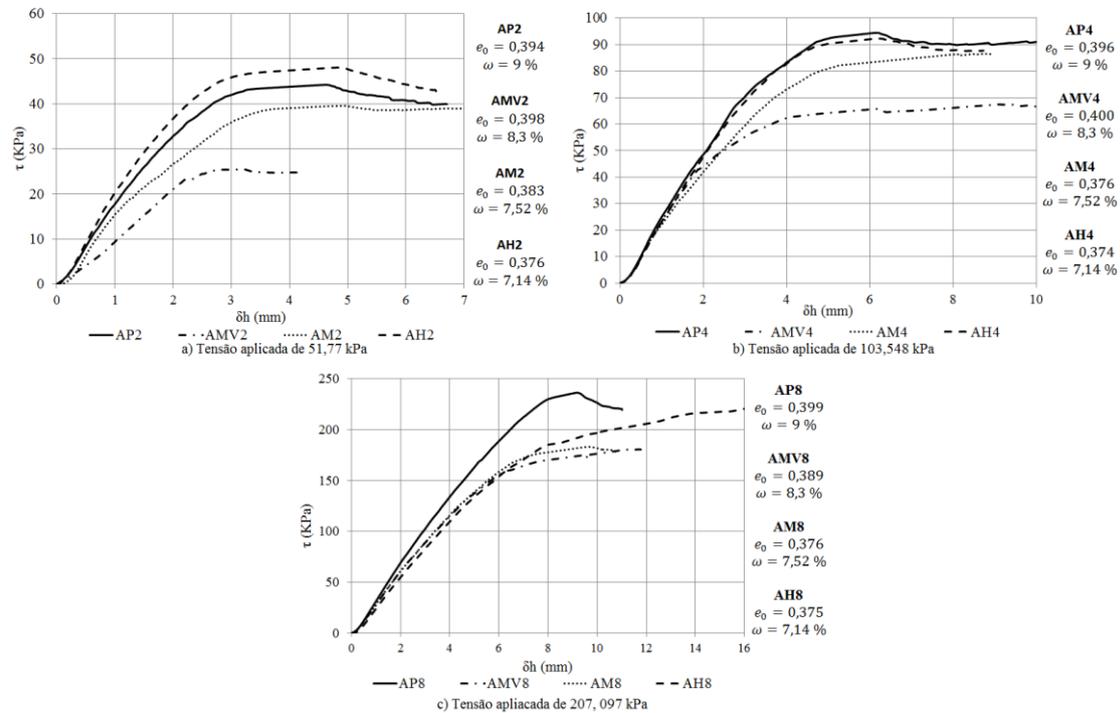


Figura 35- Evolução da tensão de corte em função do deslocamento horizontal, para cada uma das tensões aplicadas

Na argila (figura 35), constata-se que existe uma semelhança entre as tensões de corte atingidas pelas técnicas de compactação Harvard, Proctor e manual, sugerindo que estas técnicas tendem a ter comportamento semelhantes e mais dúcteis que técnica de compactação com o martelo vibratório.

#### 4.1.5 Evolução da tensão de corte em função da tensão normal

A evolução da tensão de corte em função da tensão normal aplicada clarifica qual a técnica de compactação que produziu um efeito melhor na resistência, para uma amostra de solo residual granítico. Para representar esta relação, construiu-se o gráfico representado na figura 36.

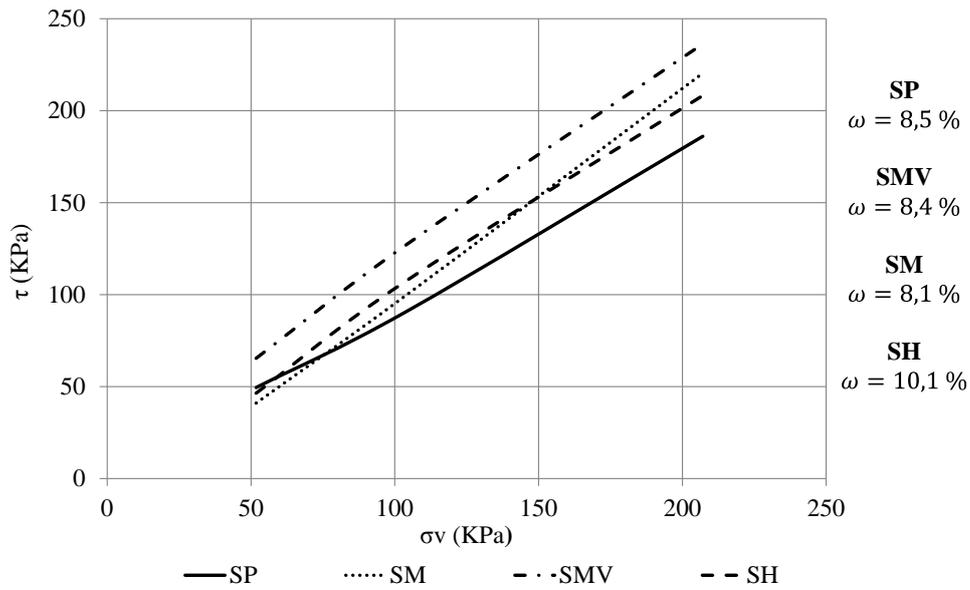


Figura 36- Evolução da tensão de corte em função da tensão normal aplicada nas amostras construídas pelas diferentes técnicas de compactação

Definindo uma linha de tendência, em cada uma das retas correspondentes a cada técnica de compactação usada, com a respetiva equação, determinou-se o ângulo de atrito de cada uma das técnicas de compactação (tabela 11). As linhas de tendência foram forçadas a passar pela origem pois em amostras reconstruídas não existe coesão. As linhas de tendência, assim como a equação que as define, estão representadas na figura 37.

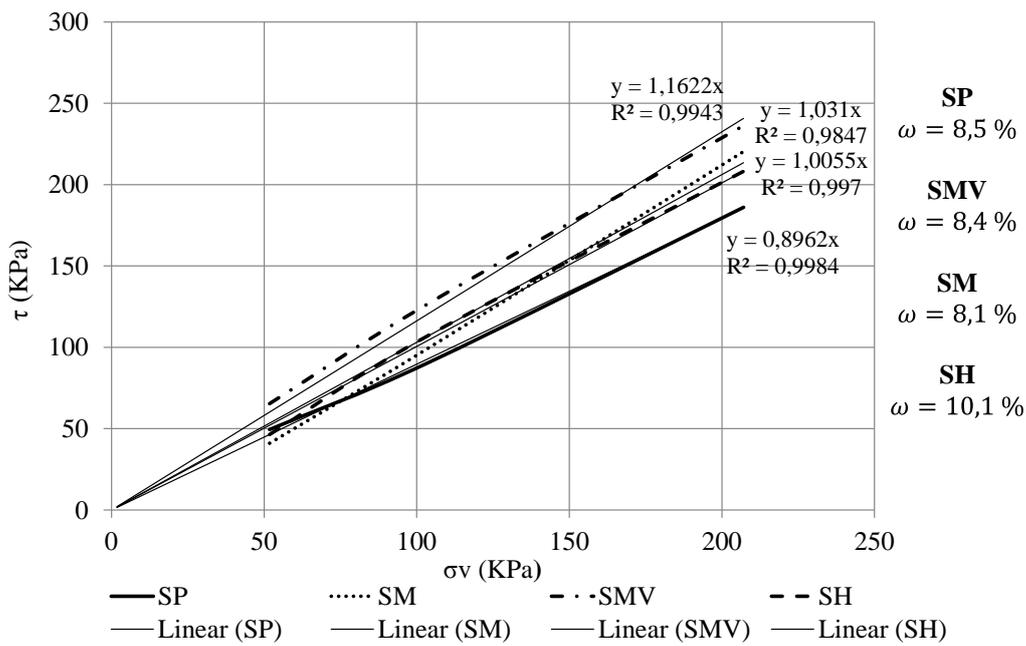


Figura 37- Evolução da tensão de corte em função da tensão normal aplicada nas amostras construídas pelas diferentes técnicas de compactação

Tabela 11- Valores do ângulo de atrito correspondente a cada técnica de compactação em estudo

Técnica de compactação	$\varphi$
Proctor	44,95
Martelo vibratório	44,84 °
Manual	44,85
Harvard	44,91

No solo residual granítico, os valores do ângulo de atrito interno, das amostras compactadas através das diferentes técnicas de compactação, é idêntico. Considera-se idêntico o ângulo de atrito interno pois a variação deste parâmetro nas várias técnicas de compactação em estudo, é inferior a 0,5%, o que é pouco significativo. Assim, o

resultado obtido nas amostras de solo residual granítico, permite afirmar que a resistência ao corte não é condicionada pela técnica de compactação na reconstrução de provetes em laboratório, pois as várias técnicas de compactação apresentaram igual ângulo de atrito interno de valor aproximado de  $45^\circ$ .

O mesmo processo foi seguido para o caso das amostras de argila ensaiadas na caixa de corte. As figuras 38 e 39 apresentam a evolução da tensão de corte em função da tensão normal aplicada para as amostras de argila.

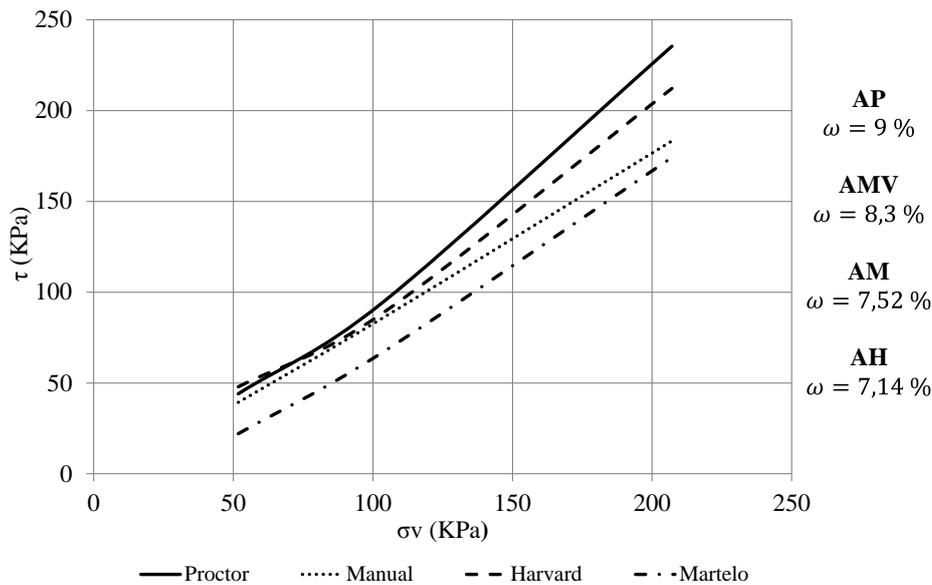


Figura 38- Relação entre a tensão normal aplicada e a tensão de corte das amostras construídas pelas várias técnicas de compactação

Na figura 39 são apresentadas as linhas de tendência e as respectivas equações, para cada uma das retas que correspondem a cada técnica de compactação em estudo. No caso da argila, tal como no solo residual granítico, forçou-se a passagem da regressão na origem pela mesma razão supracitada. A tabela 12 apresenta os valores do ângulo de atrito de interno correspondente a cada técnica de compactação.

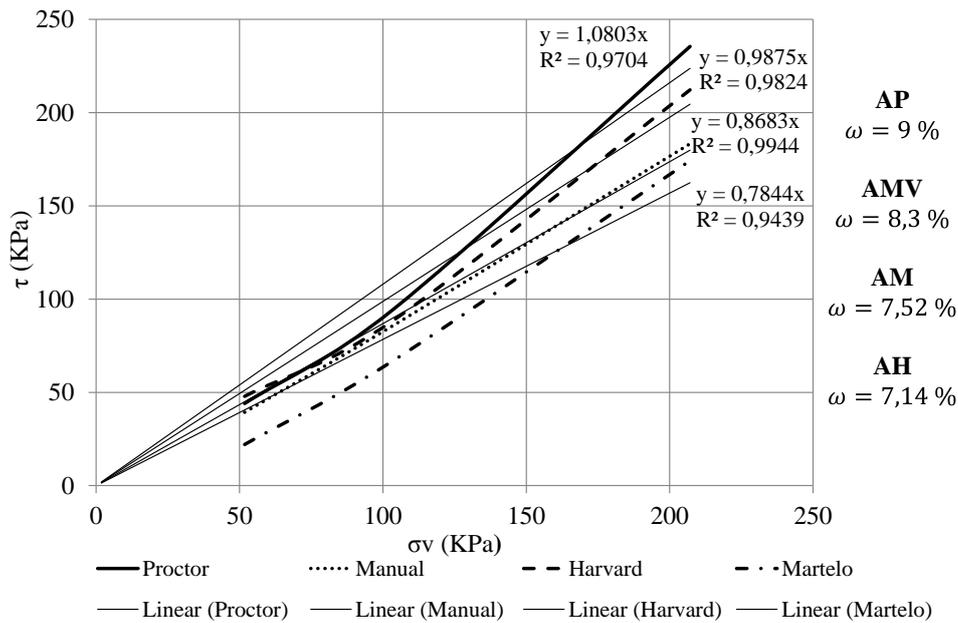


Figura 39- Relação entre a tensão normal aplicada e a tensão de corte das amostras construídas pelas várias técnicas de compactação

Tabela 12- Valores do ângulo de atrito correspondente a cada uma das técnicas de compactação usadas

Técnica de compactação	$\varphi$
Proctor	44,14
Martelo vibratório	43,35
Manual	44,84
Harvard	44,20

No caso da argila, o valor do ângulo de atrito varia um pouco entre as diferentes técnicas de compactação, estando na ordem dos 2%, o que permite afirmar que a técnica de compactação tem influência na resistência ao corte dos solos, apesar da variação ser muito pequena. Quanto maior o ângulo de atrito maior a resistência mecânica de solo, sendo que a técnica que obteve melhor resultado a nível de resistência mecânica foi a compactação manual.

#### 4.1.6 Conclusões

As amostras de solo residual granítico, sujeitas ao ensaio de corte direto quando compactadas pelas diferentes técnicas de compactação em estudo, mostraram que a técnica de compactação não tem influência na resistência mecânica do solo. Este resultado permite concordar com o que afirma Mitchell (1964) que areias compactadas do lado seco (todas as amostras foram compactadas com o valor do teor em água abaixo do ótimo) originam estruturas semelhantes independentemente do método de compactação. Parece que mais uma vez foi confirmado que o método de compactação, no lado seco, pouco afeta a estrutura do solo e as propriedades do solo compactado tal como afirma Lambe (1958).

Para as amostras de argila, o que resultado mostrou-se diferente das amostras de solo residual granítico, pois neste tipo de solo a técnica de compactação influenciou os resultados da resistência mecânica do solo, apesar da diferença entre as técnicas ser pequena. No caso da argila, as amostras também foram compactadas do lado seco (teor em água abaixo do ótimo) e as estruturas originadas mostraram-se distintas, apesar de a diferença não ser muito significativa. No caso de solos coesivos já não se verifica o que afirma Lambe (1958), caso para dizer que nesta situação o tipo de solo influenciou o resultado.

Assim, no caso da argila, conclui-se que a ordem das técnicas para o qual se obtêm melhores resistências ao corte é: compactação manual, compactação Harvard, compactação Proctor e compactação com o martelo vibratório. Em comparação com a compactação Proctor a resistência ao corte da argila diminuiu em 1,79 % na compactação com o martelo vibratório; aumentou 1,56 % na compactação manual e aumentou 0,13 % na compactação Harvard.

Parece que na argila, a compactação manual permitiu uma melhor redistribuição das partículas, o que influencia a estrutura do solo e, conseqüentemente, as características mecânicas do mesmo, tal como afirmam os autores Lambe (1958), Mitchell *et al.* (1965) e Seed e Chan (1959) (capítulo 2). No entanto, é necessário perceber que a compactação manual varia de operador para operador que executa o processo de

compactação. Cada um desses operadores exerce sobre o solo uma força de compactação, normalmente, distinta. Segundo Lambe (1958) para o mesmo teor em água quanto maior a energia de compactação maior é o grau de dispersão entre as partículas e conseqüentemente, menor resistência. Neste caso, a forma como foi realizada a compactação manual e a intensidade aplicada na compactação permitiu melhor rearranjo entre as partículas em relação às restantes técnicas. Ainda que a diferença entre as técnicas seja pouco significativa elucida o facto de que a técnica de compactação pode influenciar no comportamento do solo.

## 4.2 EDÓMETRO

### 4.2.1 Características iniciais das amostras

Na tabela 13 e 14 são apresentadas as características iniciais das amostras do solo residual granítico e argila, respetivamente, compactadas pelas diferentes técnicas de compactação em estudo, antes de serem sujeitas ao ensaio edométrico. Serão apresentados os valores do peso volúmico natural, índice de vazios inicial e teor em água de cada uma das amostras construídas.

Tabela 13- Valores iniciais característicos das amostras compactadas pelas várias técnicas de compactação em estudo

<b>Técnica de compactação</b>	<b>Designação da amostra</b>	<b><math>\gamma_{natural}(kN/m^2)</math></b>	<b><math>\omega</math> (%)</b>	<b><math>e_0</math></b>
Proctor	SP	18,603	10,7	0,529
Martelo vibratório	SMV	18,862	10,7	0,508
Manual	SM	18,612	10,7	0,529
Harvard	SH	18,589	10,7	0,531

Tabela 14- Valores iniciais característicos das amostras compactadas pelas várias técnicas de compactação em estudo

Técnica de compactação	Designação da amostra	$\gamma_{natural}(kN/m^2)$	$\omega$ (%)	$e_0$
Proctor	AP	19,563	9,5	0,494
Martelo vibratório	AMV	19,563	8,75	0,483
Manual	AM	19,090	9,5	0,529
Harvard	AH	19,008	9,5	0,537

Analisando a tabela 13 e 14 percebe-se que todas as amostras construídas, quer para o solo residual granítico, quer para a argila têm características idênticas a nível de peso volúmico natural, índice de vazios e teor em água. O facto das amostras construídas apresentarem características idênticas facilita o caso de estudo, ou seja, perceber se a técnica de compactação utilizada influência a deformabilidade do solo.

#### 4.2.2 Índice de vazios inicial e ao longo do carregamento aplicado

No solo residual granítico e na argila, com a variação do assentamento verificado aquando o ensaio edométrico de cada amostra construída, assim como, o valor índice de vazios inicial foi possível observar a evolução do índice de vazios ao longo dos carregamentos aplicados nas amostras, tal como mostram as figuras 40 a 43. As equações utilizadas para o cálculo do valor do índice de vazios, foram as equações 2 e 3 apresentadas no capítulo 3. Os gráficos apresentados contemplam as quatro técnicas de compactação e estão em escala semi-logarítmica.

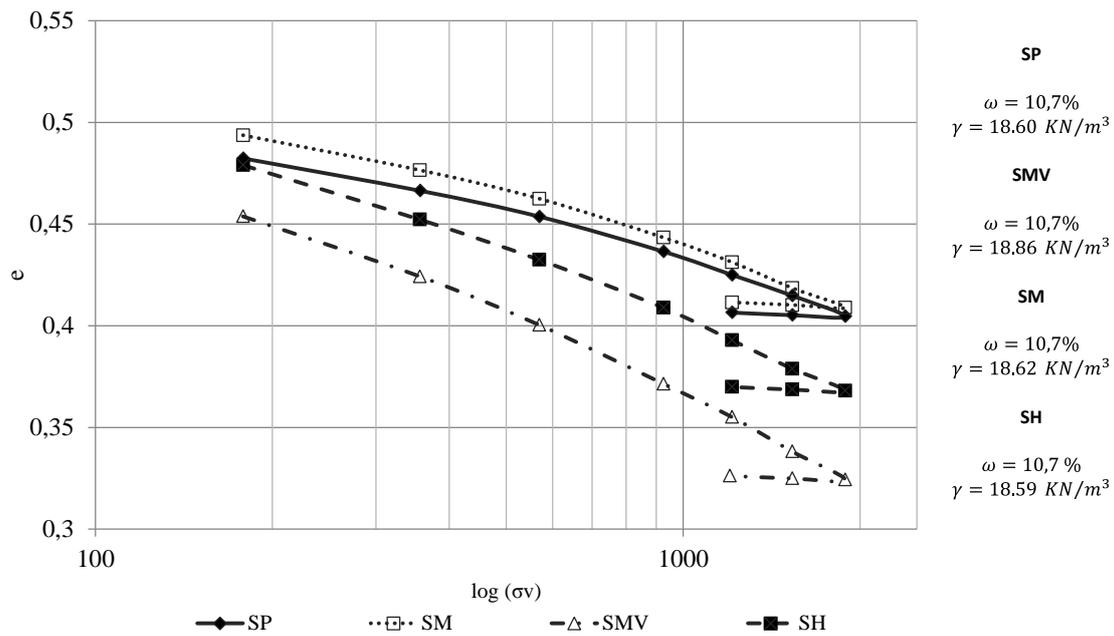


Figura 40- Diagrama que relaciona o índice de vazios com as tensões efectivas aplicadas nas amostras

Analisando a figura 40, relativamente as amostras do solo residual granítico, percebe-se que os declives das curvas que representam o índice de vazios ao longo do carregamento aplicado, a cada amostra compactada com as devidas técnicas de compactação em estudo, não são todos iguais. Note-se que os declives das curvas referentes à compactação tipo Proctor e compactação manual são idênticos e portanto, pode-se concluir que as amostras tiveram comportamentos semelhantes quando compactados com estas duas técnicas. É de notar que ambas as técnicas estão inseridas na compactação por impacto ou dinâmica que, tal como foi referido no capítulo 2, é caracterizada pela queda de um peso, de uma certa altura, um determinado número de vezes, numa camada de solo, o que se esperava que provocasse comportamentos idênticos quando sujeitas ao ensaio edométrico.

Com o valor do índice de vazios também é possível obter uma relação entre a variação do índice de vazios ao longo das tensões efetivas aplicadas. A figura 41 apresenta as curvas referentes a essa relação.

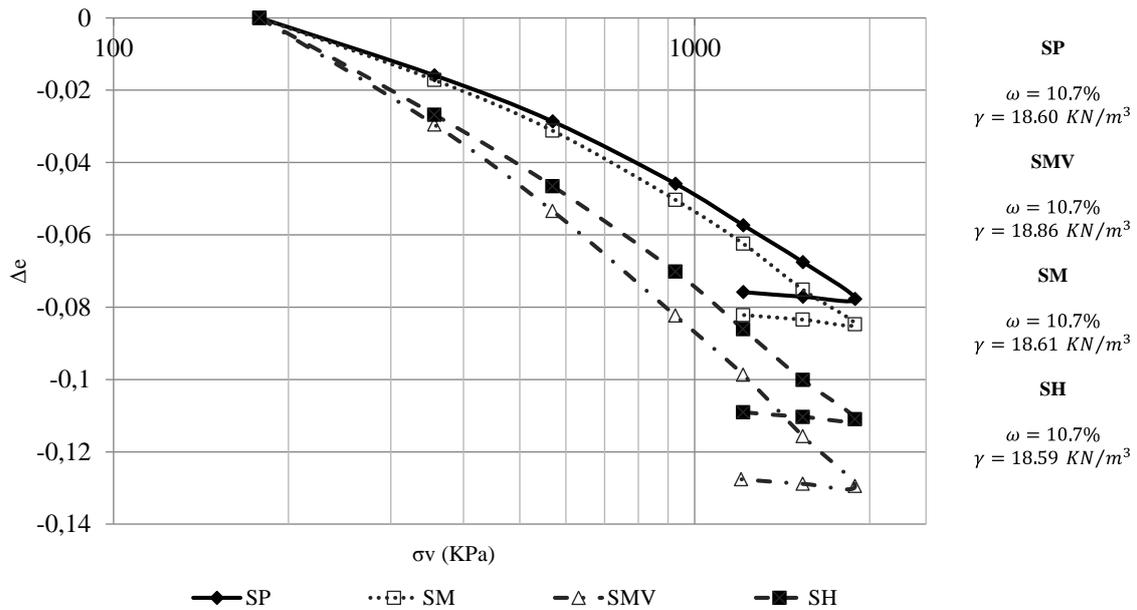


Figura 41- Relação entre a variação do índice de vazios com o carregamento aplicado às amostras

A figura 41 valida o que foi dito no parágrafo anterior, e acrescenta-se o facto de, além da técnica de compactação tipo Proctor e manual produzirem resultados idênticos, também são as que produzem menor deformabilidade ao solo, pois a variação do índice de vazios é bem inferior às restantes técnicas. Além disso, é possível acrescentar que as técnicas de compactação Harvard e martelo vibratório, além de fazerem parte de categoriais de compactação distintas (estática e por vibração, respetivamente) produziram efeitos idênticos (declive das curvas idênticas).

No caso da argila, analisando a figura 42 verifica-se que as curvas que representam o índice de vazios ao longo do carregamento aplicado, a cada amostra compactada com a devida técnica de compactação em estudo, apresentam um declive idêntico, o que permite palpitar que a técnica de compactação pode não ter tido influência na deformabilidade do solo.

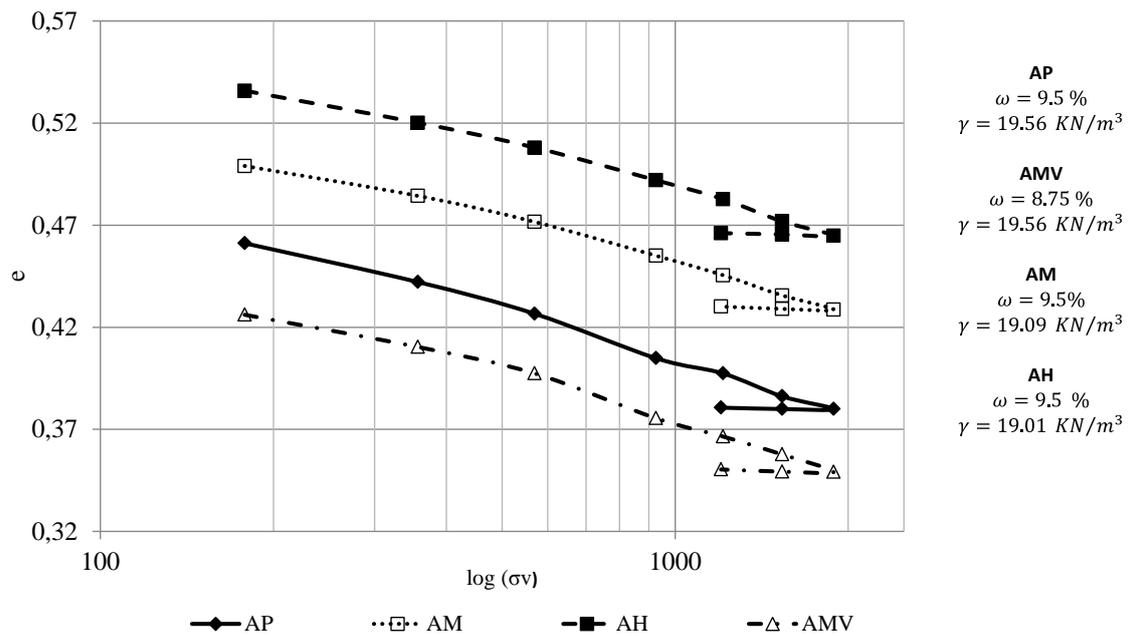


Figura 42- Diagrama que relaciona o índice de vazios com as tensões efectivas aplicadas nas amostras

Com o valor do índice de vazios foi possível obter a variação dos mesmos e construir um gráfico apresentado na figura 43 que melhor representa esta variação. Ao observar a figura 43 valida-se o que foi dito no parágrafo anterior, pois a diferença entre as técnicas de compactação em relação á variação do índice de vazios ao longo das tensões aplicadas não é muito significativa. No entanto, percebe-se que a compactação Harvard, juntamente com a compactação manual apresentam curvas bastante idênticas, notando-se uma sobreposição das mesmas, ao contrário do que acontece com as restantes técnicas. Ainda que a diferença entre os resultados da deformabilidade das amostras compactadas pelas diferentes técnicas, no caso da argila, seja pequena não deve ser ignorada e portanto, conclui-se que a técnica teve influência nos resultados da deformabilidade do solo. Tais diferenças encontradas, pode estar relacionada com a orientação e rearranjo das partículas após a aplicação da técnica de compactação. É caso para afirmar, que as técnicas de compactação Harvard e manual produziram estruturas de solo muito idênticas, resultando num melhor rearranjo entre as partículas e por isso, apresentaram deformabilidade idêntica, comparativamente com as restantes técnicas.

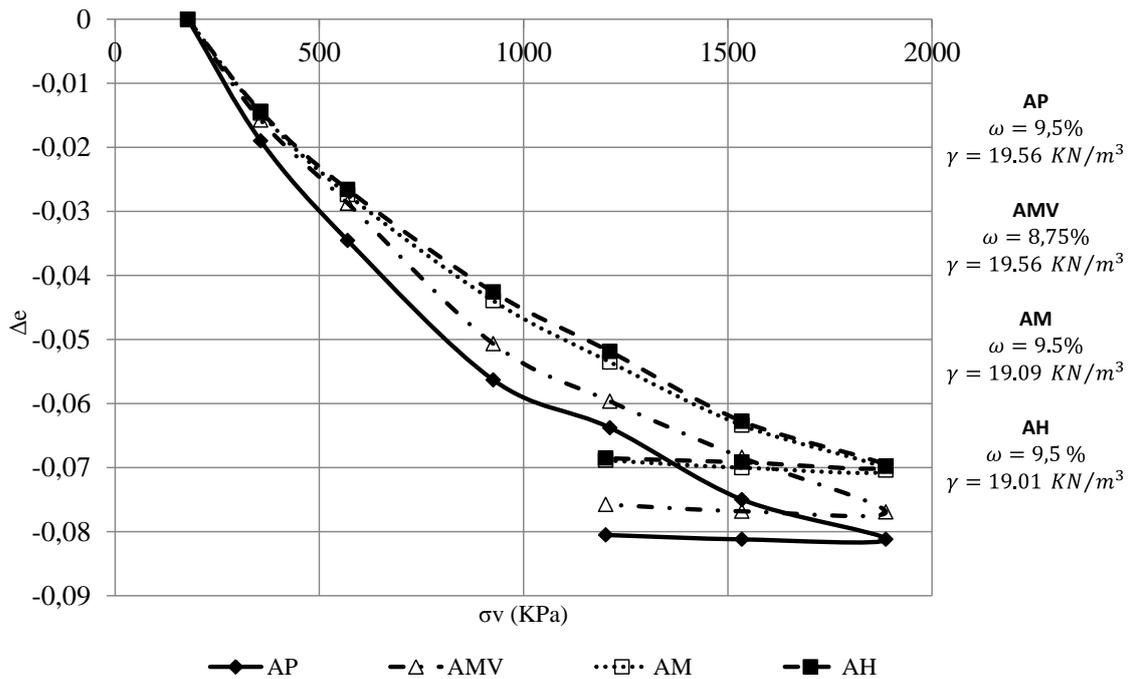


Figura 43- Relação entre a variação do índice de vazios com o carregamento aplicado às amostras

### 4.2.3 Parâmetros definidores das relações tensões- deformações

Como parâmetros definidores das relações entre as tensões aplicadas e as deformações produzidas obtidas através do ensaio edométrico, tem-se:

- O índice de compressibilidade do solo  $C_C$ ;
- O índice de recompressibilidade do solo  $C_R$ ;
- O coeficiente de compressibilidade do solo,  $a_v$ ;
- O coeficiente de compressibilidade volumétrico,  $m_v$ .

O índice de compressibilidade do solo e o índice de recompressibilidade do solo são parâmetros constantes ao longo do campo de tensões. As equações de cálculo utilizadas para definir estes índices foram as equações 7 e 8 apresentadas no capítulo 3.

No caso do solo residual granítico, a figura 44 mostra os valores destes dois parâmetros, correspondentes a cada uma das técnicas de compactação usadas.

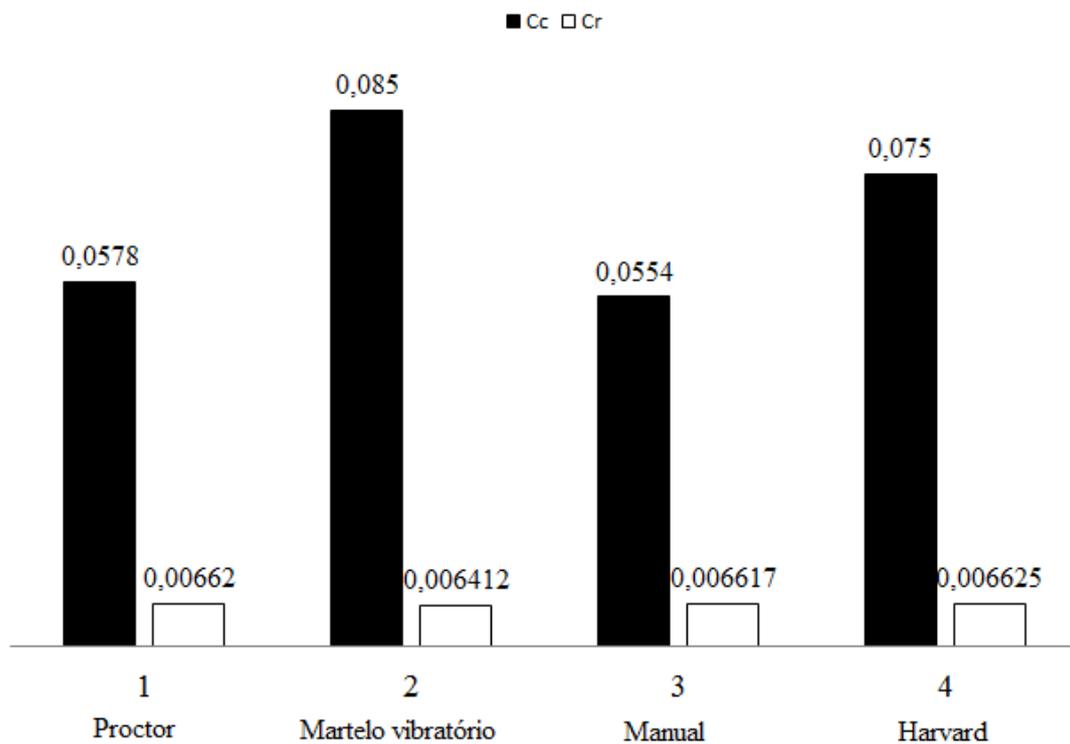


Figura 44- Valores do índice de compressibilidade e recompressibilidade do solo residual granítico correspondente a cada técnica de compactação usada

Analisando o gráfico de barras apresentado na figura 44 observa-se que o martelo vibratório apresentou maior índice de compressibilidade comparativamente com as restantes técnicas. Quanto maior for o índice de compressibilidade, menor é a compacidade do solo o que significa que o solo fica mais sujeito a sofrer deformações. Este parâmetro confirmou que a técnica de compactação que obteve piores resultados para a deformabilidade foi a compactação com o martelo vibratório, sendo que, pelo contrário, a compactação manual foi mais uma vez eficaz e a que rearranjou e orientou as partículas do solo de modo a obter melhor estrutura do solo residual granítico que as restantes técnicas. Parece claro, que o que foi dito anteriormente, quando apenas se analisava a variação do índice de vazios ao longo do campo de tensões, que a compactação manual e Proctor foram as técnicas que melhores resultados obtiveram no solo residual granítico, até porque estes índices não são nada mais, nada menos, que a razão entre a variação do índice de vazios e a variação do logaritmo das tensões aplicadas a amostra.

No caso da argila, a figura 45 mostra o valor do coeficiente de compressibilidade e recompressibilidade para cada uma das técnicas de compactação em estudo.

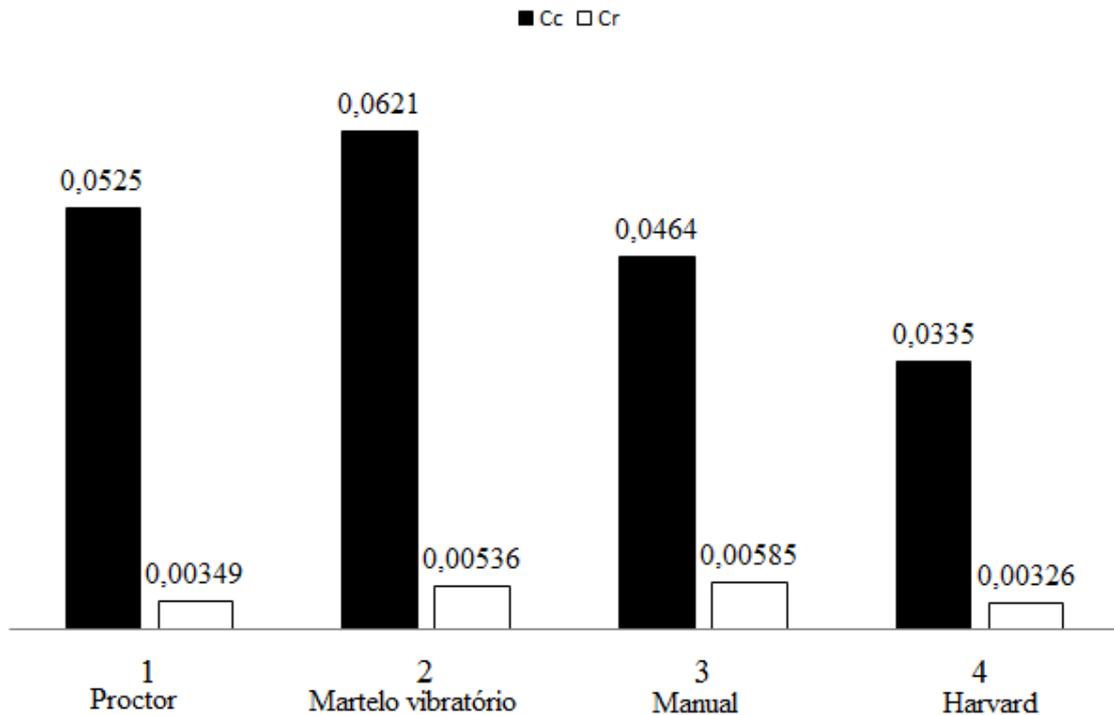


Figura 45- Valores do índice de compressibilidade e recompressibilidade da argila correspondente a cada técnica de compactação usada

Tendo o mesmo princípio e significado do cálculo destes dois parâmetros definidores do solo, explanados no parágrafo anterior referente ao solo residual granítico, verifica-se que a técnica que obtém melhor valor (mais baixo) do índice de compressibilidade do solo foi a compactação Harvard, o que faz desta técnica a que melhor resultado obteve a nível de deformabilidade da argila. Já a compactação com o martelo vibratório apresentou o valor mais alto deste índice o que faz desta técnica a que mostrou maiores deformações na argila. Mais uma vez se verifica que a técnica de compactação tem influência na deformabilidade do solo.

Os dois últimos parâmetros não são constantes ao longo do campo de tensões e portanto, foram calculados entre o estado de tensão inicial e a tensão aplicada nas amostras em cada patamar de carga. As equações usadas para o cálculo destes parâmetros estão expostas no capítulo 3, como equação 6 e 5 respetivamente.

Relativamente ao solo residual granítico, as figura 46 e 47 apresentam os gráficos que indicam os valores dos parâmetros  $a_v$  e  $m_v$ , para cada técnica de compactação em estudo.

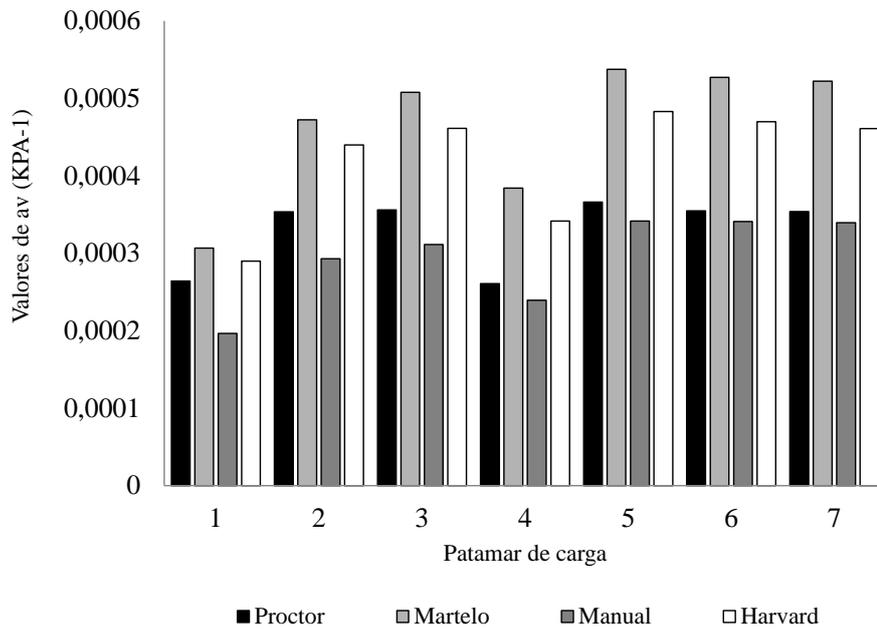


Figura 46- Valores de  $a_v$  das amostras de solo residual granítico construídas pela aplicação das diferentes técnicas de compactação em estudo

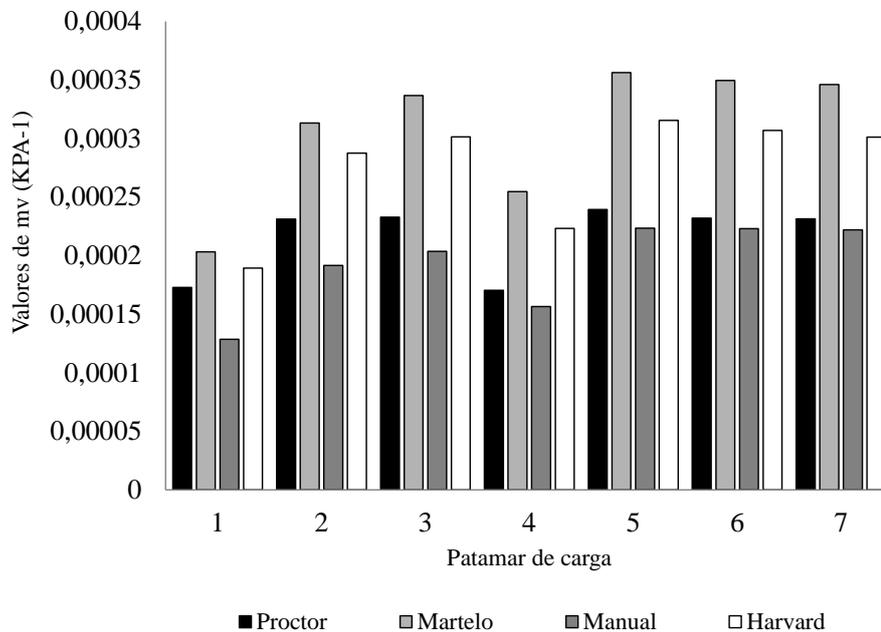


Figura 47- Valores de  $m_v$  das amostras de solo residual granítico construídas pela aplicação das diferentes técnicas de compactação em estudo

O coeficiente de compressibilidade (figura 46) e o coeficiente de compressibilidade volumétrico do solo (figura 47) também são parâmetros definidores do solo, o que significa que, quanto maiores estes coeficientes menos eficaz é a estrutura do solo. Visto que, para o cálculo do coeficiente de compressibilidade se faz a razão entre a variação do índice de vazios e a variação da tensão vertical aplicada (a tensão aplicada nas amostras foi a mesma em qualquer das técnicas de compactação), implica que quanto maior a variação do índice de vazios maior é o coeficiente de compressibilidade, ou seja, o solo é mais compressível. O coeficiente de compressibilidade volumétrico depende do valor de  $a_v$ , sendo a razão entre o  $a_v$  e a soma de uma unidade ao índice de vazios inicial, o que significa que quanto maior o índice de vazios inicial maior é o valor do coeficiente de compressibilidade volumétrico, e conseqüentemente, a deformabilidade do mesmo. Com este parâmetro, percebe-se mais uma vez que a compactação com o martelo vibratório tem piores resultados e a compactação manual a que se mostra melhor.

Com os valores do coeficiente de compressibilidade volumétrico,  $m_v$ , é possível aplicar a equação 4 apresentada no capítulo 3 e calcular a variação da altura da amostra ao longo dos carregamento aplicados. Com o valor da variação da altura das amostras ao longo do campo de tensões aplicadas, construiu-se o gráfico representado na figura 48 que melhor representa esta variação.

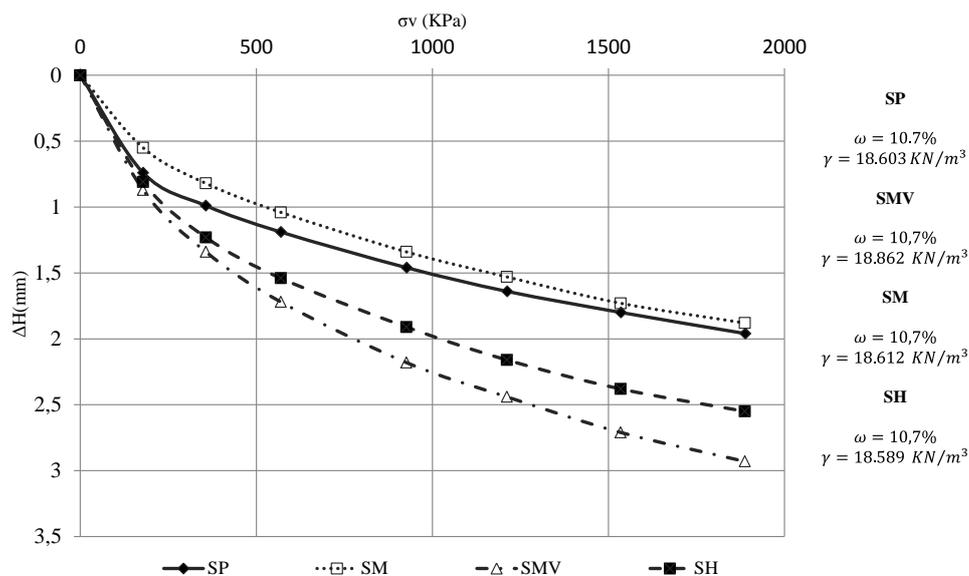


Figura 48- Variação da altura das amostras de solo residual granítico construídas pelas diferentes técnicas de compactação

Analisando a figura 48 confirma-se o que foi exposto no tópico anterior, em relação à influência da técnica de compactação na deformabilidade do solo residual granítico. Volta-se a verificar que, as amostras compactadas pela técnica de compactação Proctor e manual, foram as que obtiveram melhores resultados a nível de deformabilidade, estando em maior vantagem, ainda que pequena, a compactação manual. As restantes técnicas, martelo vibratório e Harvard continuam abaixo das restantes, verificando-se que, a técnica que obteve piores resultados a nível de deformabilidade foi a compactação com o martelo vibratório, tal como afirmam todos os parâmetros definidores calculados para as amostras de solo residual granito.

Em conclusão, acredita-se que a compactação manual permitiu uma melhor orientação das partículas o que originou uma estrutura do solo mais eficiente em relação às restantes técnicas. Esta melhor orientação entre as partículas pode estar relacionada com a energia de compactação aplicada, que por sua vez influenciou a orientação entre as partículas do solo e consequentemente, a estrutura do mesmo.

No caso da argila, as figuras 49 e 50 apresentam os gráficos com os resultados obtidos para os parâmetros  $m_v$  e  $a_v$ , para cada técnica de compactação em estudo.

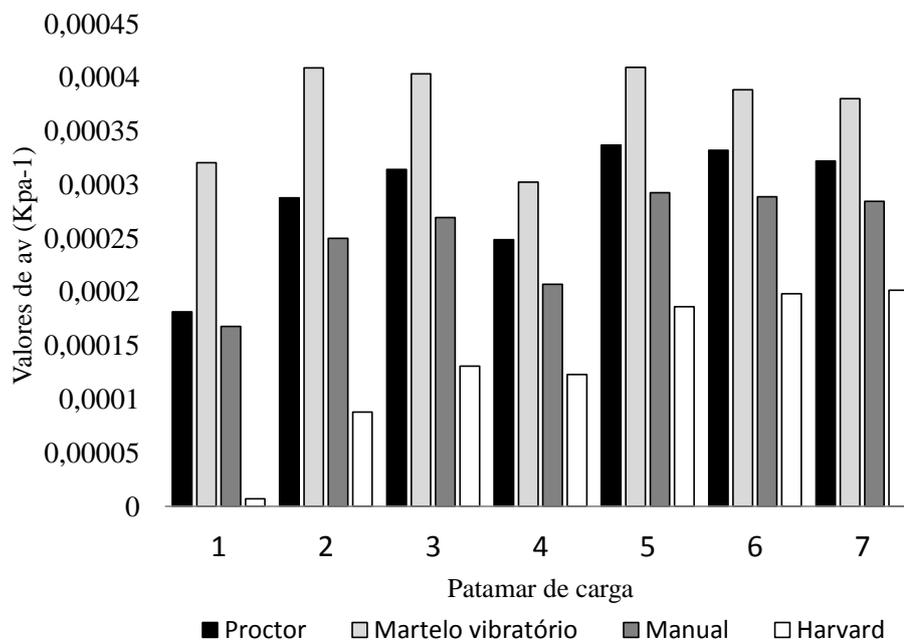


Figura 49- Valores de  $a_v$  das amostras de argila construídas pela aplicação das diferentes técnicas de compactação em estudo

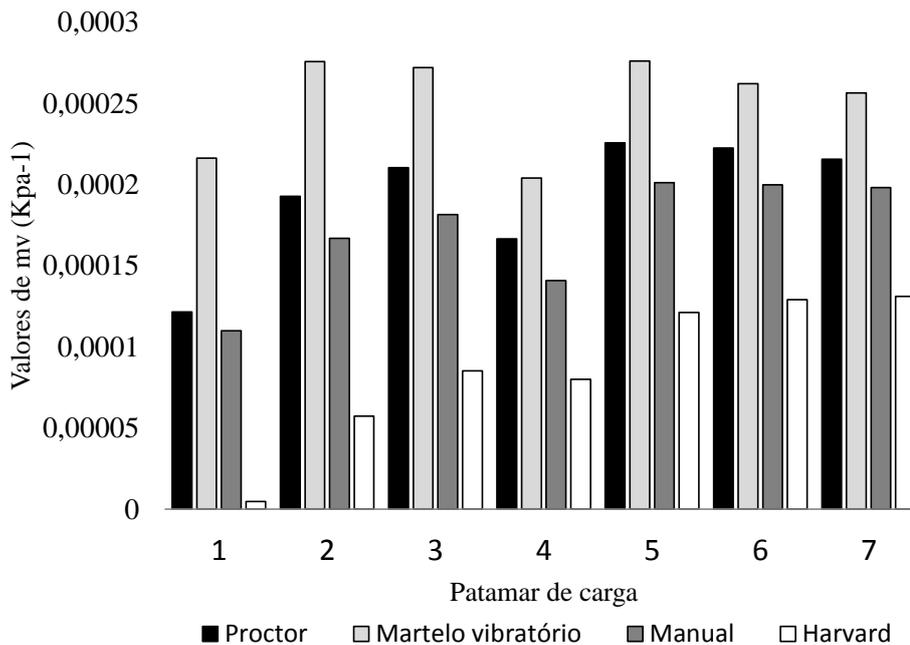


Figura 50- Valores de  $m_v$  das amostras de argila construídas pela aplicação das diferentes técnicas de compactação em estudo

Tendo por base o mesmo princípio do significado do cálculo destes dois coeficientes no caso da argila, correspondentes a cada técnica de compactação, exposto no caso do solo residual granítico, verifica-se observando estes dois gráficos de barras apresentados nas figuras 49 e 50, que na argila a técnica de compactação que obteve menores valores dos parâmetros foi a técnica de compactação Harvard, o que significa que foi a técnica que melhor resultados obteve a nível de deformabilidade do solo. Continua-se a verificar a influência da técnica de compactação na deformabilidade da argila.

Tal como foi realizado para o solo residual granítico, com os valores dos parâmetros  $m_v$  e  $a_v$  calculou-se os valores correspondentes à variação da altura da amostra ao longo do campo de tensões aplicadas, representado na figura 51.

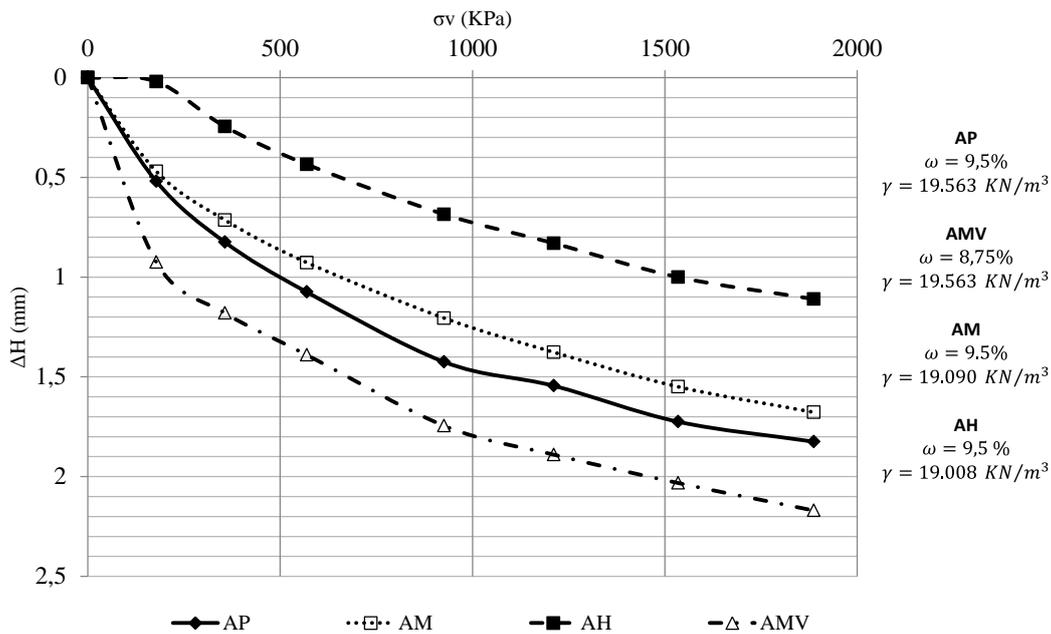


Figura 51- Variação da altura da amostra ao longo do campo de tensões aplicadas

Analisando a figura 51 confirma-se que a compactação Harvard foi a que sofreu menor deformabilidade e a compactação com o martelo vibratório a que mais deformou, no caso das amostras ensaiadas de argila.

Na argila, a compactação Harvard foi a que permitiu um melhor rearranjo das partículas e conseqüentemente, a sua estrutura. Já o martelo vibratório, foi a técnica que originou uma estrutura do solo menos capaz e portanto, conduziu a uma maior deformabilidade comparativamente com as restantes.

#### 4.2.4 Módulo de deformabilidade volumétrico do solo

O módulo de deformabilidade volumétrico do solo, também designado por módulo edométrico, representa o módulo de deformabilidade do solo para condições em que as extensões horizontais são nulas. O módulo edométrico foi calculado aplicando a equação 10 apresentada no capítulo 3, para cada um dos valores de  $m_v$  calculados no tópico anterior, para cada um dos solos em estudo. As figuras 52 e 53 apresentam o valor do  $E_{\varepsilon_h=0}$ , para cada uma das técnicas de compactação estudadas, para o solo residual granítico e argila, respetivamente.

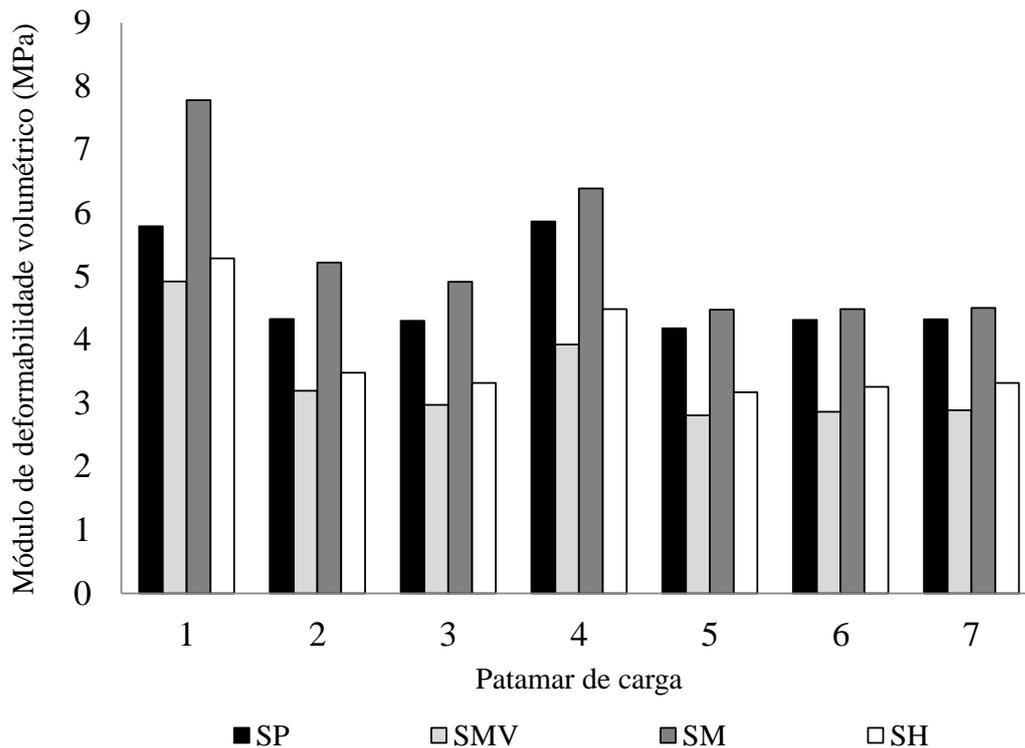


Figura 52- Valor do módulo de deformabilidade volumétrica de cada amostra de solo residual granítico construídas pelas diferentes técnicas de compactação, ao longo dos patamares de carga aplicados

Analisando os resultados obtidos para o módulo edométrico, em cada uma das amostras de solo residual granítico compactadas com a correspondente técnica de compactação, verifica-se mais uma vez que a compactação manual é que induz melhores resultados. Verifica-se também, que depois da compactação manual, a compactação tipo Proctor é a que produz melhor resultado, ficando em último as compactações com o martelo vibratório e Harvard. Quanto maior o módulo edométrico maior é a resistência à compressão do solo, o que significa que o solo encontra-se mais compacto e conseqüentemente, mais resistente. Esta resistência deriva da estrutura que a técnica de compactação confere ao solo. Assim, afirma-se que a compactação manual, no caso do solo residual granítico, conferiu ao solo um melhor rearranjo das partículas do solo.

No caso da argila, os resultados obtidos para o módulo edométrico, em cada uma das amostras de argila compactadas com a correspondente técnica de compactação, conduz mais uma vez a afirmar que a compactação Harvard é que induz melhores resultados. Verifica-se também, que depois da compactação Harvard, a compactação manual é a que produz melhor resultado, ficando em último as compactações tipo Proctor e martelo

vibratório. Observando a figura 51, vê-se claramente a diferença entre os valores do módulo edométrico obtidos com a técnica de compactação Harvard, com os restantes valores correspondentes às outras técnicas em estudo. É claro, o facto que a compactação Harvard, no caso da argila, condicionou de forma significativa a estrutura do solo e consequentemente, a sua baixa deformabilidade e alto módulo edométrico.

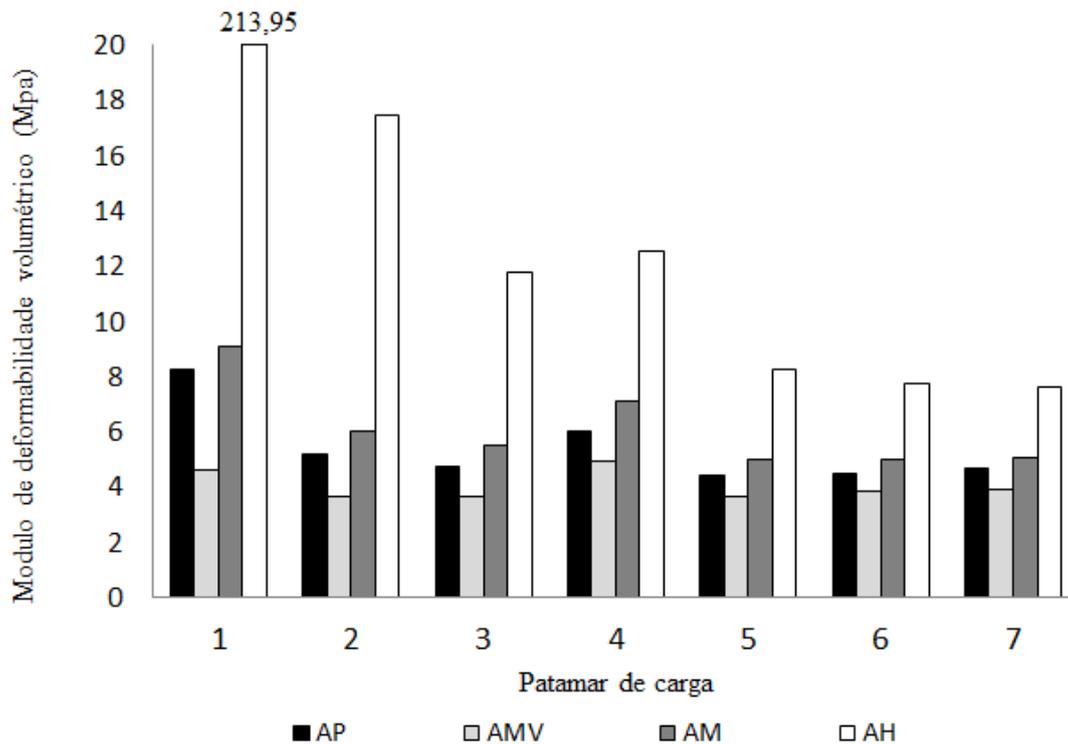


Figura 53- Valor do módulo de deformabilidade volumétrico de cada amostra de argila construídas pelas diferentes técnicas de compactação, ao longo dos patamares de carga aplicados

#### 4.2.5 Coeficiente de consolidação

O coeficiente de consolidação apenas foi calculado para o caso da argila, pois apenas neste solo se teve em conta o assentamento ao longo do tempo. Com a curva que relaciona o assentamento ao longo do tempo, para cada carregamento aplicado, calculou-se o valor de  $c_v$  pelo método de Casagrande. Em seguida, apresenta-se um exemplo de como foi realizado o cálculo de  $c_v$  por este método, sendo os restantes apresentados em anexo.

- *Exemplo do cálculo de  $c_v$  pelo método de Casagrande*

Na figura 54 é apresentado o assentamento ao longo do tempo correspondente á amostra retirada da compactação tipo Proctor, patamar de carga 5.

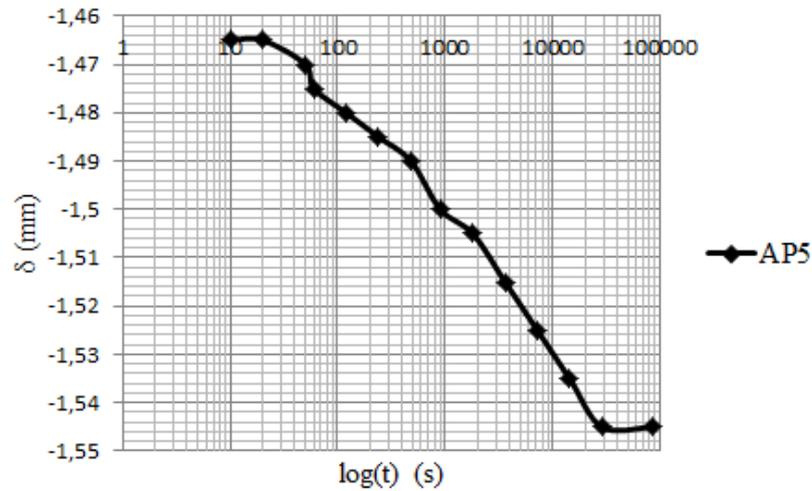


Figura 54 - Evolução do assentamento em função do logaritmo do tempo

Assim, para o cálculo do valor do coeficiente de consolidação ( $c_v$ ) pelo método de casa grande foram realizados os seguintes procedimentos:

1. Traçou-se duas tangentes ao diagrama de ensaio. A ordenada do ponto de intersecção dessas mesmas tangentes corresponde ao assentamento  $s_{100}$ , tal como ilustra a figura 55 .

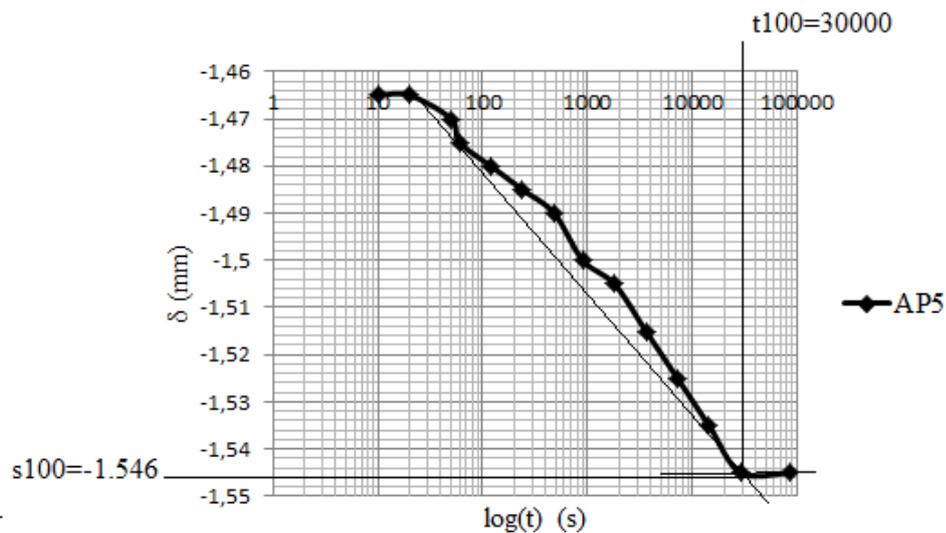


Figura 55- Processo seguido para retirar o valor de  $s_{100}$

- Em seguida, corrigiu-se a parte inicial da curva de forma a determinar o verdadeiro  $s_0$ . Para isso, escolheu-se dois instantes, nomeadamente  $t_A$  e  $t_B = 4t_A$  obtendo-se os valores do assentamento correspondentes a esses mesmos instantes ( $s_A$  e  $s_B$ ). A figura 56 ilustra esse processo.

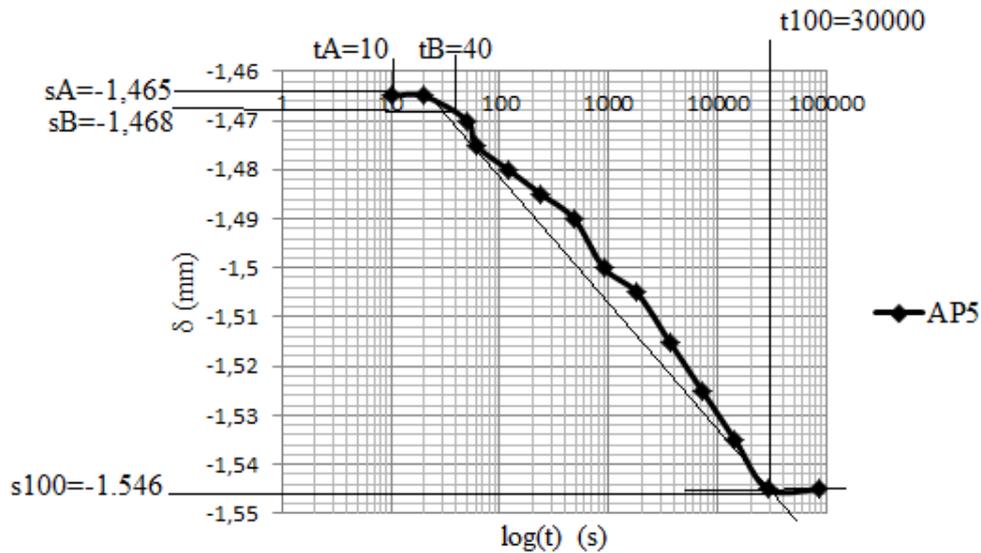


Figura 56- Processo seguido para retirar os valores de  $s_A$  e  $s_B$

Dessa forma o valor corrigido de  $s_0$  vale:

$$s_0 = s_A - (s_B - s_A) \quad (12)$$

- Em seguida, determinou-se o valor de  $s_{50}$  (equação 12) e a respetiva ordenada  $t_{50}$ , tal como ilustra a figura 57.

$$s_{50} = \frac{(s_{100+s_0})}{2} \quad (13)$$

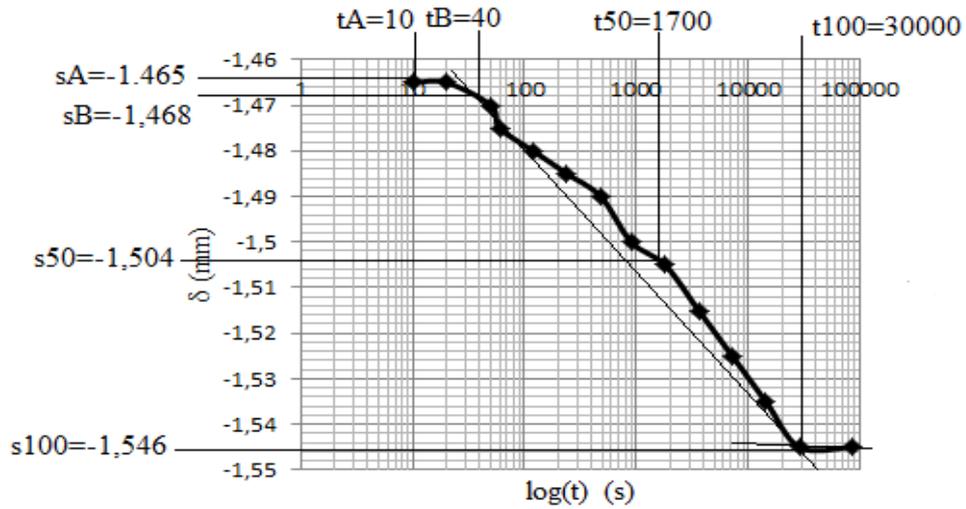


Figura 57- Processo para retirar o valor de t50

4. Por fim, calculou-se o valor de  $c_v$ , aplicando a equação 13, onde o valor de  $H_0$  corresponde a altura inicial da amostra.

$$c_v = \frac{0.197 \times H_0^2}{t_{50}} \quad (14)$$

Na figura 58 são apresentados todos os valores do coeficiente de consolidação referentes a cada técnica de compactação.

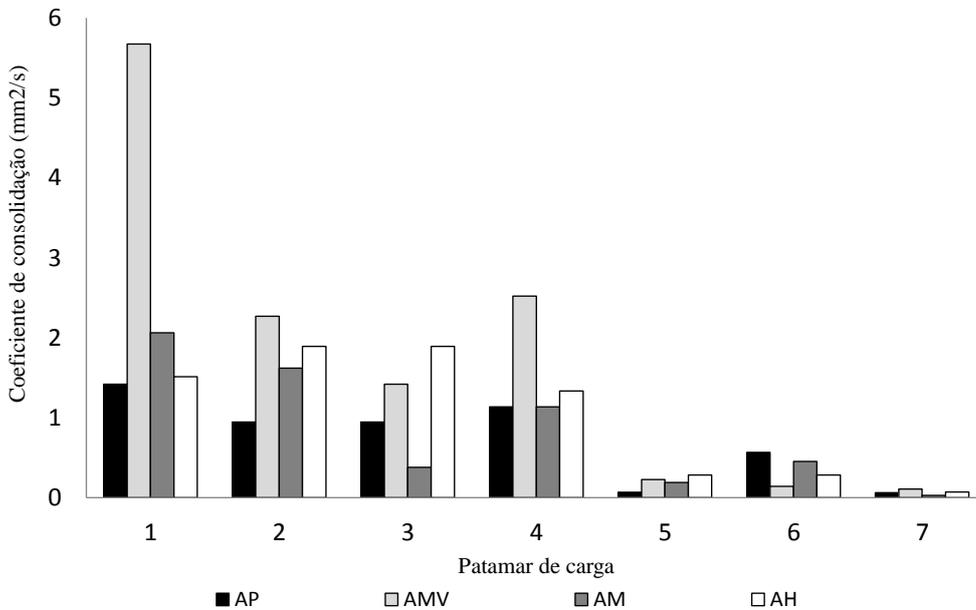


Figura 58- Valor do coeficiente de consolidação da argila por patamar de carga e por técnica de compactação em estudo

Tal como previsto e coerente com o que foi analisado anteriormente, relativamente aos outros parâmetros, a compactação com o martelo vibratório foi a que apresentou maiores valores do coeficiente de consolidação, o que significa que o solo é mais compressível. A compactação Harvard foi a que, de uma maneira geral, apresentou valores mais baixos de coeficiente de consolidação e portanto, solos menos compressíveis e estrutura do solo mais eficaz em relação à deformabilidade.

#### 4.2.6 Permeabilidade do solo

Com o valor do coeficiente de consolidação calculou-se o respetivo valor da permeabilidade da argila, aplicando a equação 9 (capítulo 3), apresentados na figura 59.

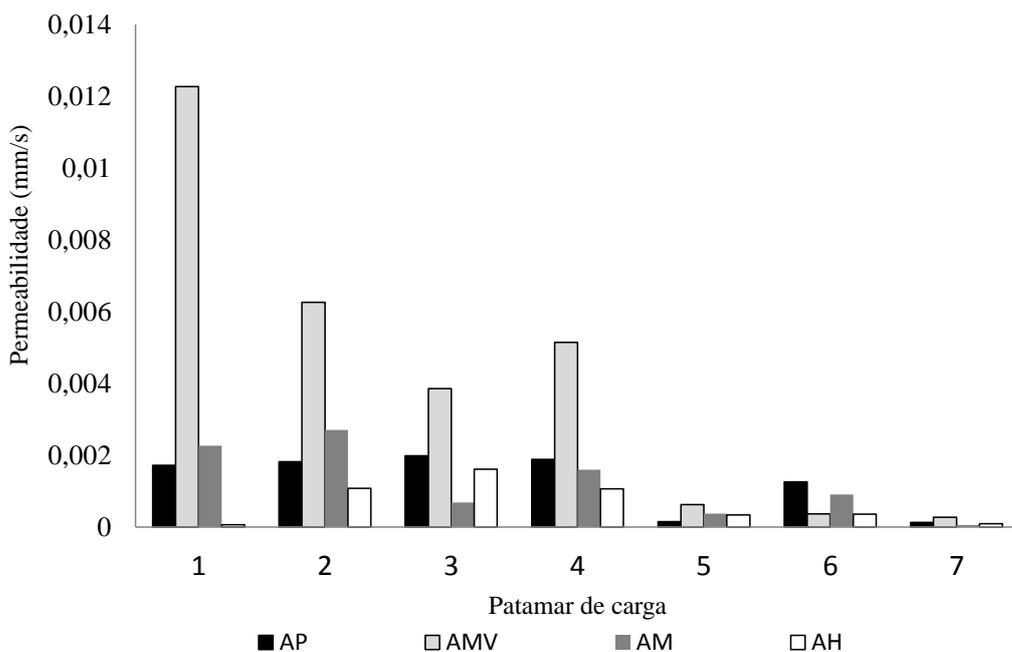


Figura 59- Valor da permeabilidade da argila por patamar de carga e por técnica de compactação em estudo

Analisando a figura 59 a compactação Harvard foi a que obteve menor permeabilidade comparativamente com as restantes técnicas e a compactação com martelo vibratório a que maior valor de permeabilidade apresentou. Estes valores são coerentes, pois como a permeabilidade depende de forma direta do coeficiente de consolidação, quanto maior o coeficiente de consolidação maior a permeabilidade do solo. Como o ideal é produzir

solos com permeabilidade baixa, então conclui-se que mais uma vez a compactação Harvard é a que produz melhor estrutura do solo, a nível de vários fatores (deformabilidade, coeficiente de consolidação, módulo edométrico, permeabilidade, entre outros).

#### 4.2.7 Conclusões

No caso do solo residual granítico, tendo em conta os resultados obtidos, nomeadamente em relação entre o índice de vazios e tensões aplicadas, relação entre a variação da altura da amostra com as tensões aplicadas, assim como todos os parâmetros definidores do solo, para todas as técnicas de compactação em estudo, conclui-se que a ordem das técnicas de compactação que produzem melhores resultados a nível da deformabilidade deste tipo de solo é: compactação manual, compactação Proctor, compactação Harvard e compactação com martelo vibratório. As figuras 60 a 62 mostram as percentagens das variações dos parâmetros do solo residual granítico, quando compactadas pelas diferentes técnicas, comparativamente com a compactação Proctor.

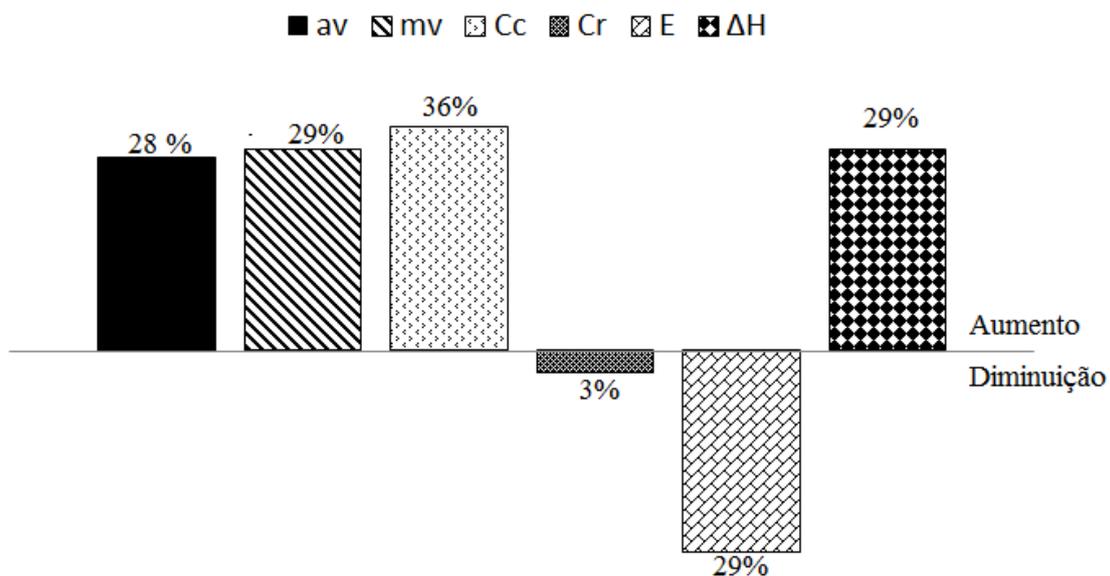


Figura 60- Percentagens da variação dos parâmetros do solo quando compactados com martelo vibratório, comparativamente com a compactação Proctor

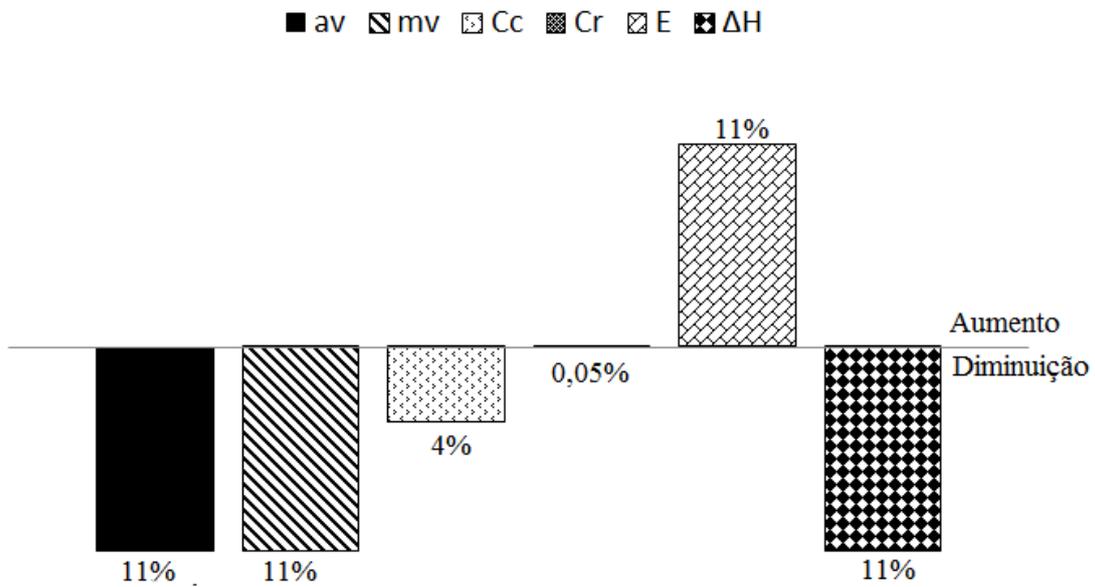


Figura 61- Percentagens da variação dos parâmetros do solo quando sujeitos a compactação manual, comparativamente com a compactação Proctor

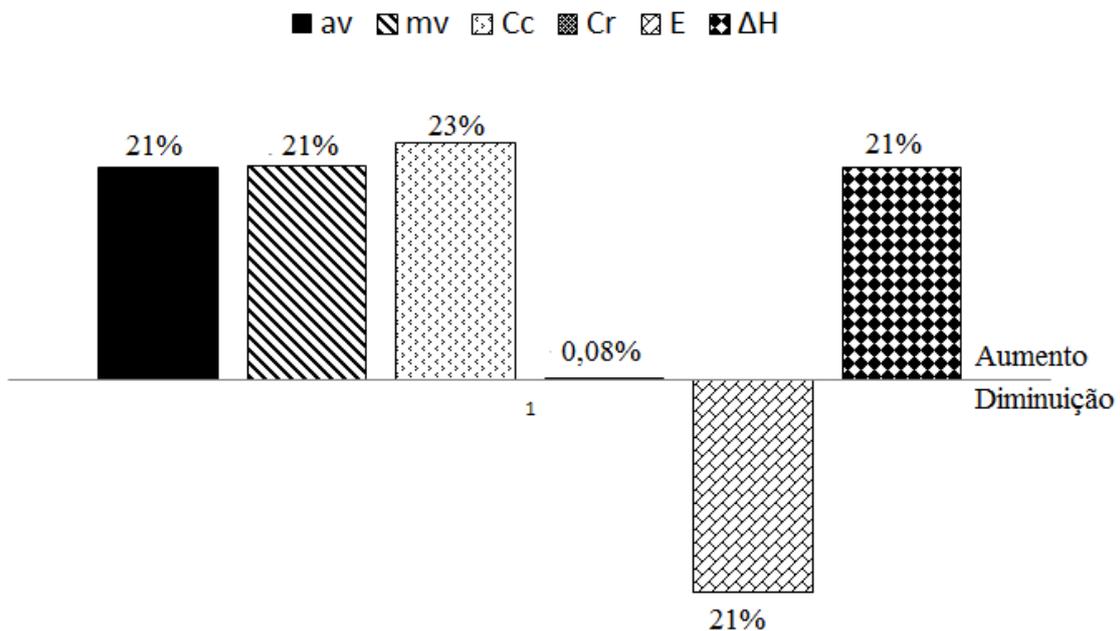


Figura 62- Percentagens da variação dos parâmetros do solo quando sujeitos a compactação Harvard, comparativamente com a compactação Proctor

Estes resultados podem ser explicados através das diferentes estruturas do solo que as distintas técnicas originam, tal como já foi exposto anteriormente. Por exemplo, Mitchell (1993) refere que a formação da estrutura de um solo após a compactação é em

função do tipo de solo, teor em água, intensidade e a forma como se aplica a energia de compactação, sendo a estrutura um dos fatores mais importantes para conhecer o comportamento dos solos. Além de Mitchell (1993), autores como Garcia-Bengochea *et al.*, (1979), Acar e Oliveri (1990) e Benson e Daniel (1990), afirmam que são obtidos diferentes arranjos das partículas consoante o tipo de solo, o método de compactação utilizado e a energia aplicada. O novo arranjo que a compactação confere ao solo determinará as suas características como material estrutural, ou seja, a resistência, compressibilidade, permeabilidade e deformabilidade do solo.

Assim, a diferença entre as técnicas pode estar relacionada, tal como afirma Mitchell (1993) pela intensidade e forma como se aplicou a energia de compactação, visto que as outras razões tais como, tipo de solo, teor em água não se justificam neste caso, pois os ensaios foram realizados para o mesmo tipo de solo e com o mesmo teor em água.

A compactação com o martelo vibratório e a compactação Harvard têm algo em comum, tal como a compactação tipo Proctor e a compactação manual. No que diz respeito as duas primeiras, estas compactam o solo como se fosse uma unidade só, ou seja, o solo é compactado na totalidade ao mesmo tempo. Já nas últimas duas, a compactação é feita por frações, pois o equipamento utilizado não é capaz de abranger toda a área de solo e, portanto, esta é feita aplicando pancadas em pequenas quantidades da camada do solo. Por estas razões, pode afirmar-se que as técnicas agrupadas originam estruturas semelhantes do solo pois tem o mesmo princípio de compactação e, por isso, os seus comportamentos à deformabilidade foram igualmente semelhantes, tal como foi verificado em todos os parâmetros calculados e relações efetuadas ao longo da análise do comportamento do solo residual granítico quando sujeito ao ensaio edométrico.

No entanto, é necessário ter em conta que, tal como já foi dito anteriormente, a compactação manual não é realizada por todos os indivíduos da mesma forma, ou seja, a energia de compactação que um determinado indivíduo aplica ao solo, normalmente, é diferente da energia de compactação que outro indivíduo aplica no mesmo solo. Este parâmetro é definidor para os resultados obtidos, tal como afirmam os autores anteriormente supracitados. Neste estudo parece que, a energia aplicada para compactar manualmente este tipo de solo foi definidora de um melhor comportamento à deformabilidade do solo. Contudo, se fosse outro operador a realizar a compactação

manual neste mesmo tipo de solo, o resultado poderia não ser o mesmo. Este tópico carece ainda de aprofundamento.

Relativamente á argila, os resultados mostraram que a compactação Harvard foi a que obteve melhores resultados a nível de deformabilidade da amostra. Conclui-se assim que, a ordem das técnicas para o qual se produz menor deformabilidade da argila é: compactação Harvard, compactação manual, compactação com Proctor e compactação com martelo vibratório. As figuras 63 a 65 mostram as percentagens da variação dos parâmetros característicos da argila, quando compactada pelas diferentes técnicas comparativamente com a compactação Proctor.

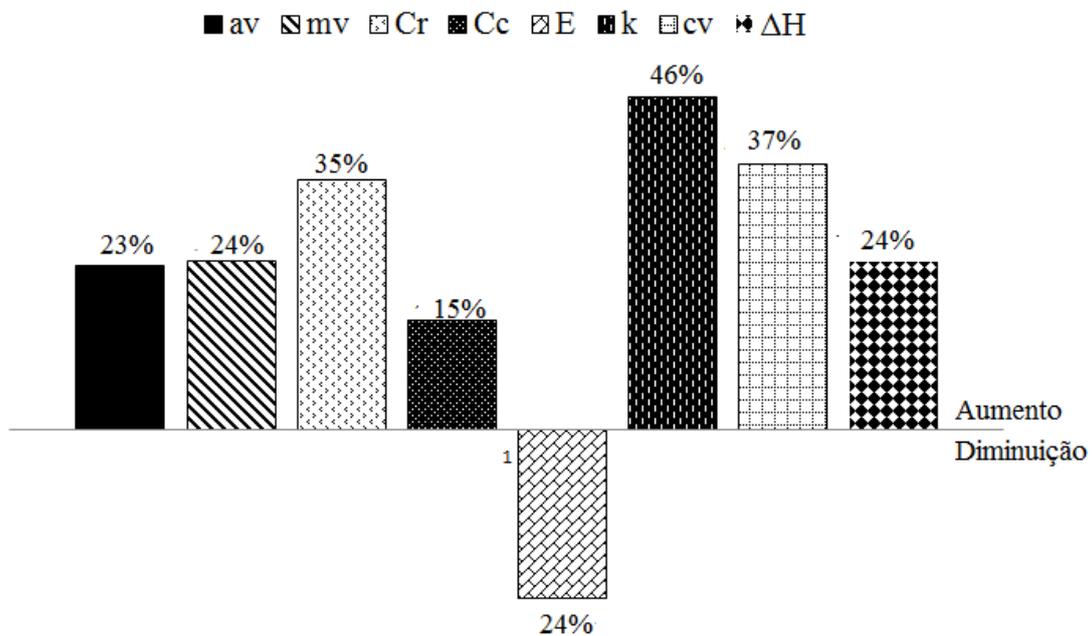


Figura 63- Percentagens da variação dos parâmetros do solo quando sujeitos a compactação com martelo vibratório, comparativamente com a compactação Proctor

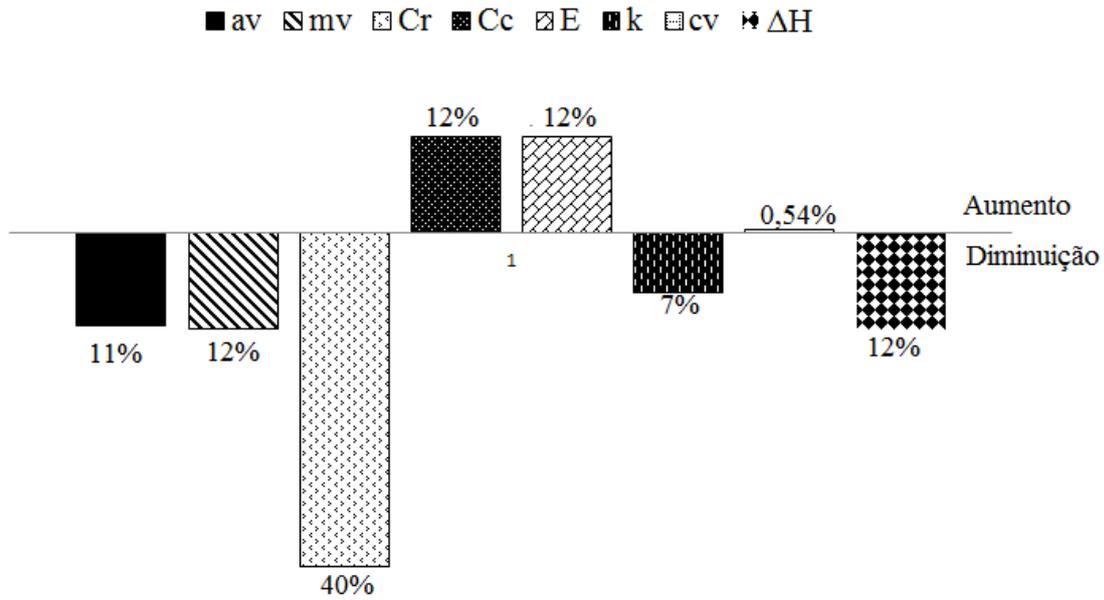


Figura 64- Percentagens da variação dos parâmetros do solo quando sujeitos a compactação manual, comparativamente com a compactação Proctor

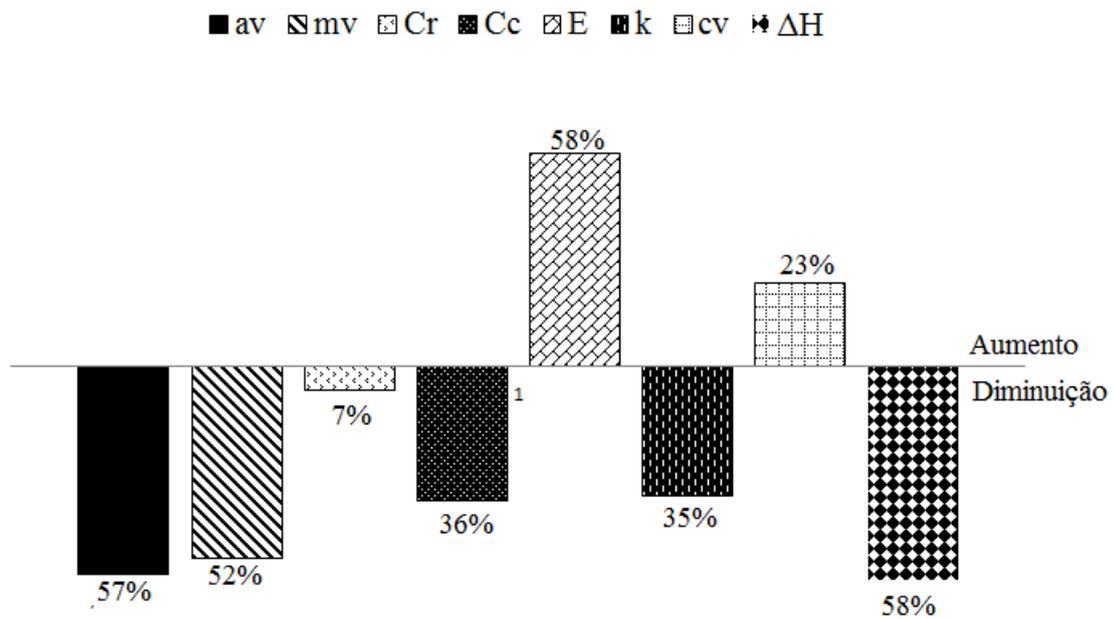


Figura 65- Percentagens da variação dos parâmetros do solo quando sujeitos a compactação Harvard, comparativamente com a compactação Proctor

Estes resultados podem estar relacionados mais uma vez com a estrutura do solo, ou seja, a orientação das partículas do solo quando compactado pela técnica de compactação Harvard. Esta técnica, no caso da argila teve melhores resultados, pois rearranjou as partículas de maneira mais eficaz o que contribuiu para um melhor resultado a nível de deformabilidade deste tipo de solo.



## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Em suma, depois de feitas as várias análises ao longo do tratamento dos resultados, obtidos pelos dois ensaios a que foram sujeitas as amostras construídas, pelas diferentes técnicas de compactação, verifica-se que, de maneira geral, a técnica de compactação em estudo tem influência na resistência mecânica e deformabilidade dos solos. Tendo isto, o objetivo principal deste caso de estudo foi cumprido.

Para o caso do solo residual granítico, o ensaio realizado para avaliar a resistência mecânica do solo, não foi muito suscetível á técnica de compactação usada. O que se entende deste resultado, é que a resistência mecânica do solo residual granítico não é afetada com a técnica de compactação usada. Nas areias, verifica-se que no ramo seco (amostras compactadas com teor em água abaixo do ótimo) não apresentam diferenças quanto a á resistência ao corte originando estruturas semelhantes. Já a nível de deformabilidade, este solo apresentou sensibilidade á técnica de compactação utilizada. Verificou-se que a compactação manual foi a que originou uma estrutura do solo mais eficiente, com menor índice de vazios, menor compressibilidade quando sujeita a carregamentos, e conseqüentemente, melhor módulo edométrico. Estes fatores são definidores da estrutura do solo que tal como afirma Mitchell (1993) influência de forma direta o comportamento do mesmo.

Relativamente à argila, verificou-se que a técnica de compactação influencia quer a resistência mecânica quer a deformabilidade deste tipo de solo. Em relação á resistência mecânica, a técnica de compactação manual foi a que obteve maior ângulo de atrito interno o que implica uma maior resistência. No que diz respeito á deformabilidade, a técnica que melhores resultados obteve com uma diferença significativa, foi a compactação Harvard. Os resultados obtidos foram influenciados pela estrutura que a

técnica de compactação conferiu ao solo, sendo que numas foi mais favorecida e noutras técnicas menos.

Relativamente às quatro técnicas de compactação aplicadas nos diferentes solos, verificou-se que estas tiveram maior influência na deformabilidade dos solos do que na resistência ao corte, visto que as diferenças apresentadas são mais significativas na deformabilidade do que na resistência ao corte dos solos.

Segundo, as conclusões retiradas deste caso de estudo, é caso para concordar com os vários autores nomeados ao longo da revisão bibliográfica, que afirmam que muitos são os fatores que podem estar na razão das diferenças encontradas. Verificou-se que a técnica de compactação é um desses fatores, no entanto, não é o único. A este fator estão associados outros fatores que podem influenciar o comportamento dos solos, como a energia de compactação aplicada, o tipo de solo entre outros já nomeados anteriormente. Tende-se a concordar com Cruz (1967) quando afirma que cada tipo de compactação origina estruturas de solo bastante semelhantes mas acrescenta-se o facto de o tipo de solo ter influência na sensibilidade às diferentes técnicas de compactação.

A principal conclusão deste estudo é que cada tipo de solo tem um determinado comportamento, quando compactado em diferentes condições. Não é simples dizer que uma determinada técnica de compactação é melhor para um determinado solo ou pior para outro tipo de solo. É apenas necessário ter em conta que, provavelmente, qualquer técnica de compactação confere ao solo o resultado pretendido, desde que seja feito nas condições ótimas de modo a obter as melhores características estruturais do solo.

## **5.2 TRABALHOS FUTUROS**

De forma a melhor perceber a influência da técnica de compactação na resistência mecânica e deformabilidade do solo são sugeridos os seguintes estudos futuros:

- Avaliação dos mesmos solos mas através do ensaio triaxial;
- Realização da compactação manual, nos mesmos solos, por outro operador;
- Melhoramento/revalidação do processo de consolidação do equipamento da caixa de corte direto.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ASTM (1970). *Special Procedures for Testing Soil and Rock for Engineering Purposes*. ASTM Committee D-18, STP 479.

Balmaceda, Alfredo R. (1991). *Suelos compactados- un estudio teorico y experimental*, Universitat Politècnica de Catalunya, Tesis Doctoral, Barcelona.

Baptista, C. de F. Nogueira (1976). *Pavimentação*, Editora Globo, Toma 1 e 2.

Bell, J.R. (1977). *Compaction Energy Relationships of Cohesive Soils*, Transportation Research Record, No. 641, pp 29-34.

Benson, C.H.; Daniel, D.E. (1990). *Influence of Clods on Hydraulic Conductivity of Compacted Clay*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 8, pp. 1231-1248.

BS EN 196-1 (1995). *Methods of testing cement- part 1: Determination of strength*, British Standard Institution.

BSI (1990a). *Methods of test for soil for civil engineering purposes - part 5: Compressibility, permeability and durability tests*. British Standards Institution, ref. BS 1377-5:1990.

BSI (1990a). *Methods of test for soil for civil engineering purposes - part 5: Compressibility, permeability and durability tests*, British Standards Institution, ref. BS 1377-5:1990.

BSI (1990b). *Methods of test for soil for civil engineering purposes - part 7: shear strength test (total stress)*. British Standards Institution, ref. BS 1377-7:1990.

BSI (1990c). *Methods of test for soil for civil engineering purposes - part 8: shear strength test (effective stress)*. British Standards Institution, ref. BS 1377-8:1990.

BSI (1990d). *Methods of test for soils for civil engineering purposes. Compaction-related tests*. British Standards Institution, ref. BS 1377-4:1990.

Camapum de Carvalho, J.; Crispel, J.J.; Mieussens, C.; Nardone, A. (1987). *La reconstitution des éprouvettes en laboratoire, Théorie et pratique opératoire*, Rapport de Recherche LPC N°145.

Cruz, Paulo Teixeira da (1967). Propriedades de engenharia de solos residuais compactados da região centro- sul do Brasil, Escola Politécnica, USP, São Paulo, pp.21-29.

Daniel, D.E.; Benson, C.H. (1990). *Water Content Density Criteria for Compacted Soil Liners*, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.116, No.12, pp. 1811-1830.

Dantas, G. (2013). *Estudo do emprego do Compactador Giratório Superpave na compactação de um solo argiloso*, Tese de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Dhawan, C.L.; Bahri, J.C. (1957). *Stable density*, Proc., 47, International Conference on soil mechanics and Foundation Engineering, London, Vol.1, pp.149-152.

EN 13286-2 (2004). *Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 2: Test methods for the determination of the laboratory reference density and water content - Proctor compaction*, European Standard.

EN 13286-3 (2003). *Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 3: Test methods for laboratory reference density and water content – Vibrocompression with controlled parameters*, European Standard.

EN 13286-4 (2003). *Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 4: Test methods for laboratory reference density and water content –Vibrating Hammer*, European Standard.

EN 13286-5 (2003). *Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 5: Test methods for laboratory reference density and water content – Vibrating Table*. European Standard.

Garcia-Bengochea, I.; Lovell, C.W.; Altschaeffl, A.G. (1979). *Pore Distribution and Permeability of Silty Clays*, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105, No.7, pp. 839-856.

Highter WH, Altschaeffl AG, Lovell JR CW (1970). *Low-Temperature effects on the compaction and strength of a sandy clay*. *Highw Res Rec*, pp. 45-51.

Hilf, J.W. (1975). *Compacted Fill, Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, pp. 244-311.

Johnson, A.W; Sallberg, J.R. (1962). *Factors influencing compaction test results*, HRB, Bulletin, 319.

K.H. Head (2006). *Soil Classification and Compaction Tests*. Manual of soil Laboratory Testing, Third Edition, Vol.1, pp. 319-364.

Lambe, T.W., Whitman, R.V. (1979). *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons.

Lambe, T.W. (1958). *The Structure of Compacted Clay*, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 84, No.SM2, pp. 1654-1-1654-34.

Lambe, T.W. (1958). *The structure of compacted clay*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the soil Mechanics and Foundations Division, Vol.84, n°SM2, Part 1, May.

Lamb, T.W.; Whitman, R.V. (1979). *Soil mechanics, SI version*, John wiley & Sons.

Mitchell, J.K. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior*, Ed. John Wiley and Sons, Inc. University of California, USA, pp 437.

Mitchell, J.K.; Hooper, D.R.; Campanella, R.G. (1965). *Permeability of Compacted Clay*, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 91, No. SM4, pp. 41-65.

Prochaska, A.B., Drnevich, V.P. (2005) *One-point Vibrating Hammer compaction test for granular soils*. Papel de conferência, Geotechnical Special Publication, pp.71-85.

Proctor, R. (1975). *The Design and Construction of Rolled Earth Damns*, Engineering News Record III, 1933, pp.7, 21 e 28; In: Hilf, J.W. *Compacted Fill*, Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Company, New York, pp. 244-311.

Proctor, R.R. (1933). *Fundamental Principles of Soil Compaction*, Engineering News Record, pp. 20-28.

Raghavan, G.S.V.; Ohu, J.O. (1985). *Prediction of Static Equivalent Pressure of Proctor Compaction Blows*, American Society of Agricultural Engineers (ASAE), Vol. 28, No. 5, pp. 1398-1400.

S.Kenai, R.Bahar, M.Benazzoung (2006). *Experimental analysis of the effect of some compaction methods on mechanical properties and durability of cement stabilized soil*. Journal of Materials Science, Vol.41, pp. 6956-6964.

Seed, H.B.; Chan, C.K. (1959) *Structure and Strength Characteristics of Compacted Clays*, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 85, No.SM5, pp 87-128.

Seed, H.B.; Chan, C.K.; Lee, C.E. (1962). *Resilience characteristics of subgrade soils and their relation of fatigue failures in asphalt pavements*, International conference on structural design of asphalt pavements, University of Michigan, pp. 1-23.

Seed, H.B.; Monismith, C.L. (1954). *Relationships between density and stability of subgrade soils*, HRB, Bulletin 93.

Senço, W.de. (1997). *Manual de técnicas de pavimentação*, Editora Pini, Vol.1.

Silva,R (2013). *Repair of Earth Constructions by Means of Grout Injection*. Tese de doutoramento, Universidade do Minho.

Soares,E (2013). *Melhoria do solo residual granítico com recurso à activação alcalina de cinzas volantes*. Tese de doutoramento, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

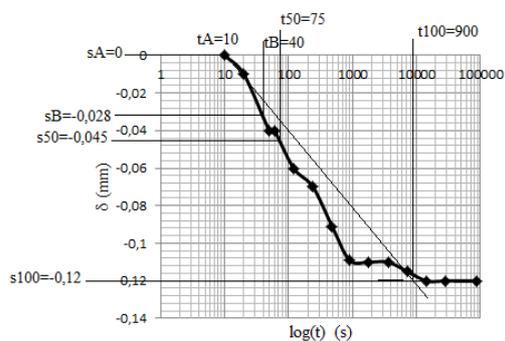
Wang Long, Xie Xiaoguand, Luan Hai (2011). *Influence of Laboratory Compaction Methods on Shear Performance of Graded Crushed Stone*. Journal of Materials in Civil Engineering, pp.1483-1487.

Werk.S (2000). *Estudo da influência dos métodos de compactação no comportamento resiliente de solos*, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

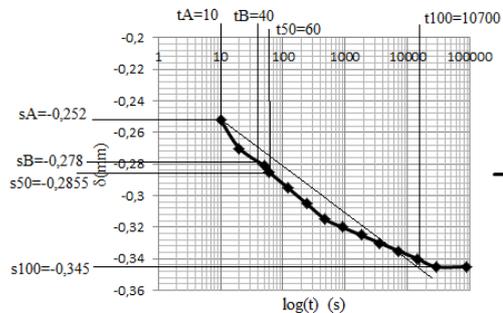


# ANEXO I

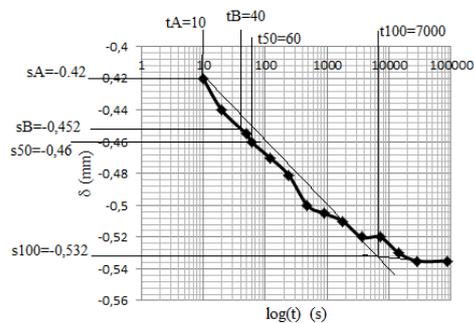
- Coeficiente de consolidação da argila ( $c_v$ ) pelo método de Casagrande.



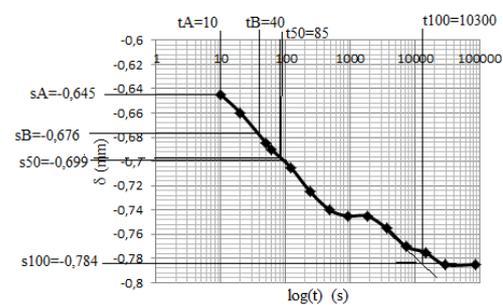
◆ AH1



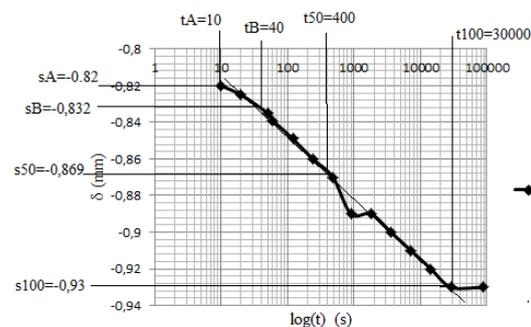
◆ AH2



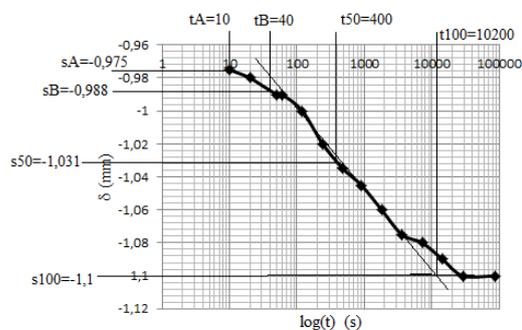
◆ AH3



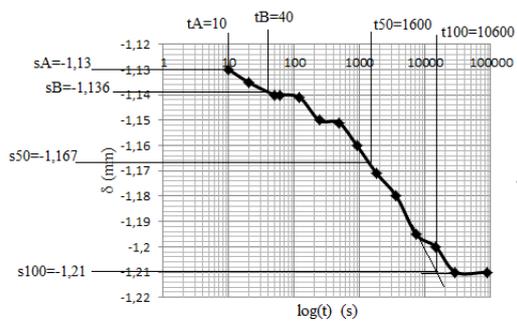
◆ AH4



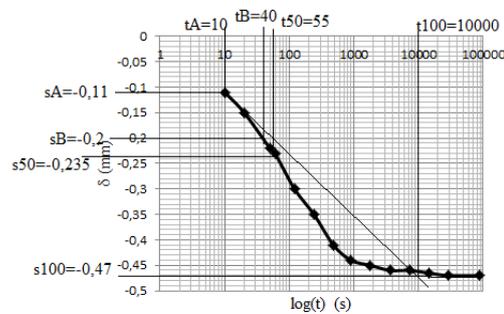
◆ AH5



◆ AH6

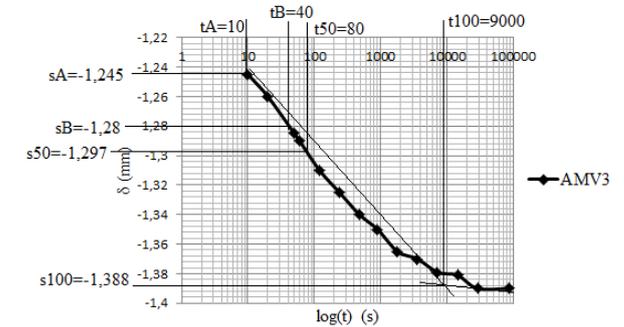
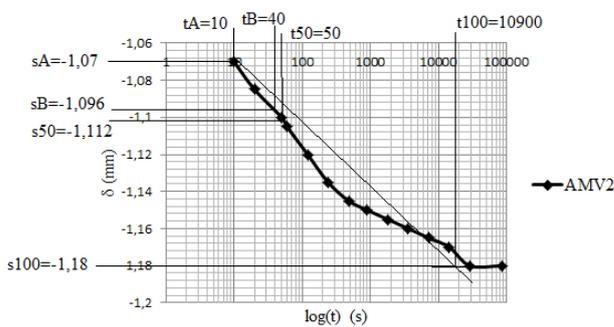
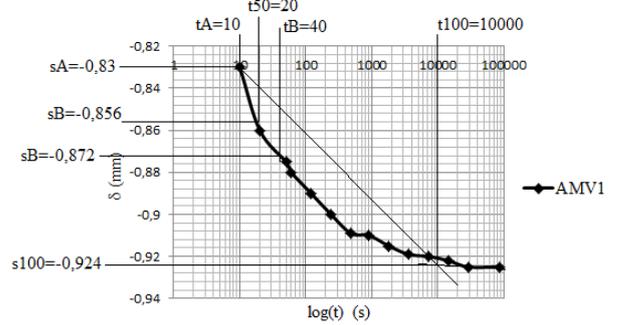
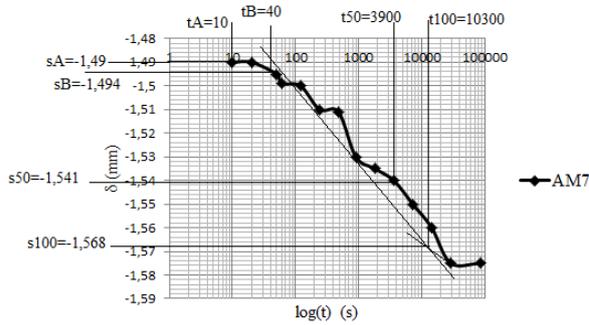
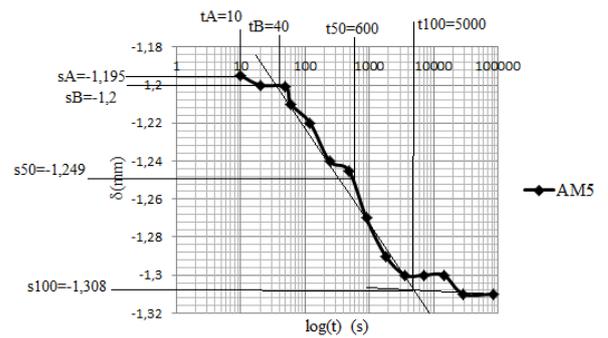
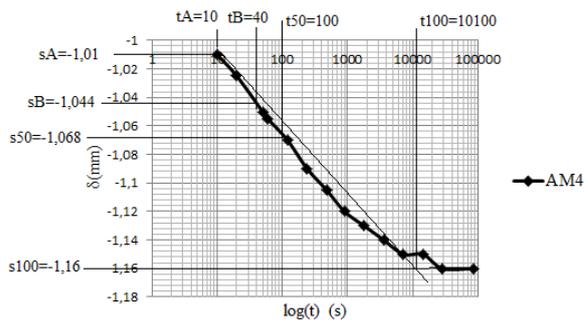
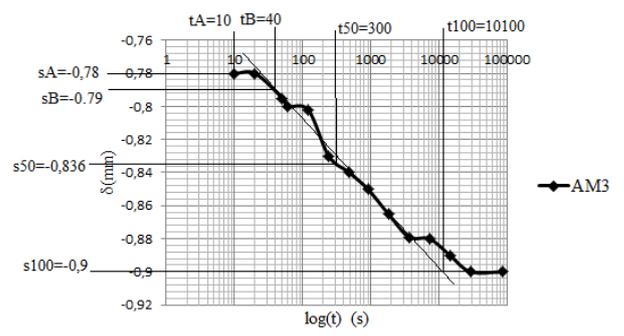
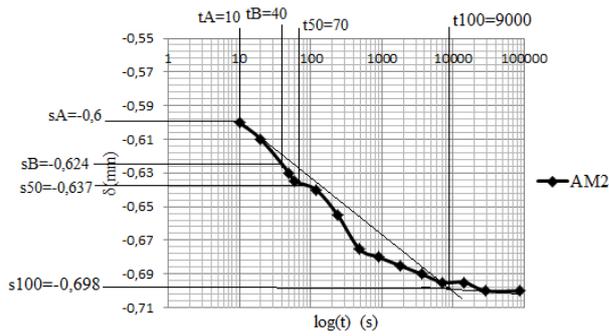


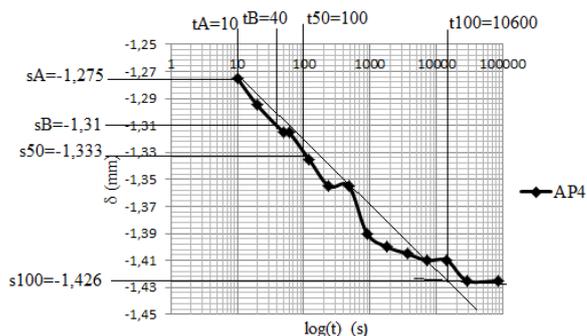
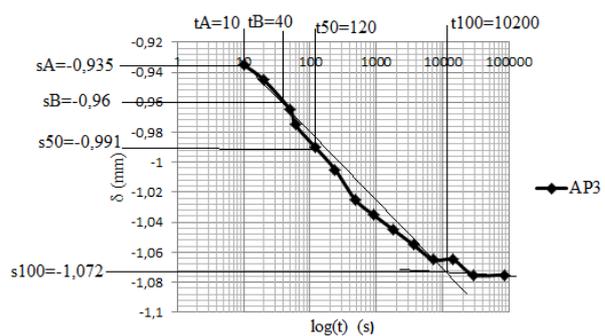
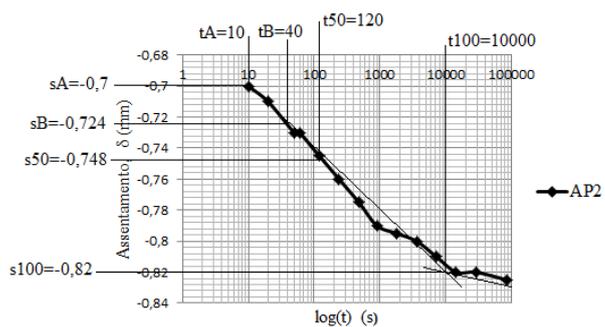
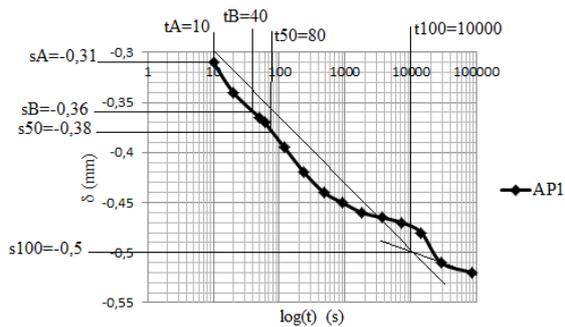
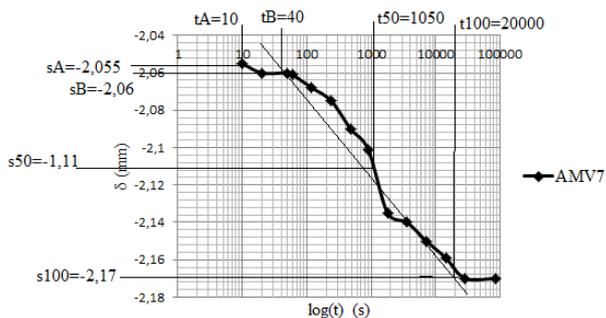
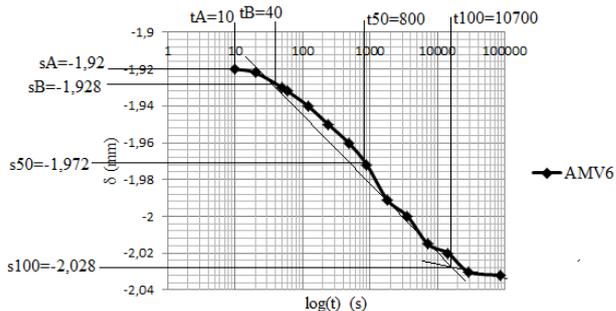
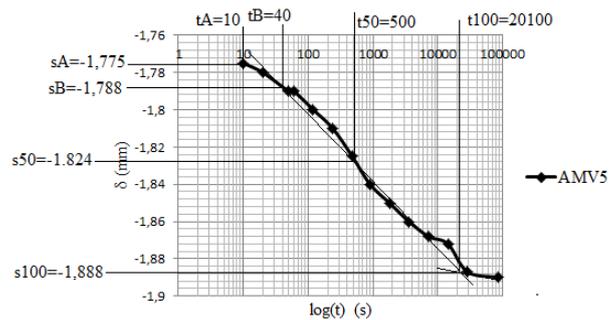
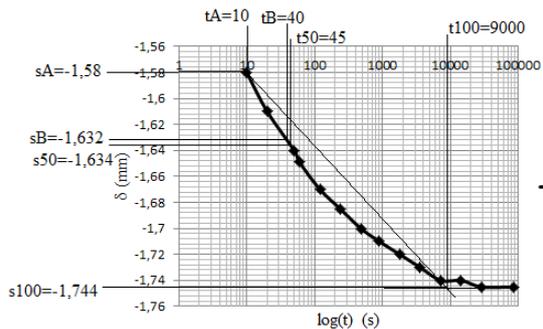
◆ AH7



◆ AM1

Influência da técnica de elaboração de provetes laboratoriais na quantificação da deformabilidade e resistência mecânica dos solos





Influência da técnica de elaboração de provetes laboratoriais na quantificação da deformabilidade e resistência mecânica dos solos

