



Rita Cristina dos Ramos

# CARACTERIZAÇÃO NO "HOLLOW CYLINDER APPARATUS" DO COMPORTAMENTO CÍCLICO DA AREIA DE HOSTUN

## CHARACTERIZATION OF THE CYCLIC BEHAVIOUR OF HOSTUN SAND USING THE HOLLOW CYLINDER APPARATUS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Geotecnia,  
orientada pelo Professor Doutor Paulo A. L. F. Coelho e pelo Professor Doutor Luis M. Araújo Santos

Coimbra, 5 de junho de 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Rita Cristina dos Ramos

# **CARACTERIZAÇÃO NO "HOLLOW CYLINDER APPARATUS" DO COMPORTAMENTO CÍCLICO DA AREIA DE HOSTUN**

## **CHARACTERIZATION OF THE CYCLIC BEHAVIOUR OF HOSTUN SAND USING THE HOLLOW CYLINDER APPARATUS**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Geotecnia,  
orientada pelo Professor Doutor Paulo A. L. F. Coelho e pelo Professor Doutor Luis M. Araújo Santos

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.  
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer  
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões  
que possa conter.

Coimbra, 5 de junho de 2018

## **AGRADECIMENTOS**

Chegando à reta final do meu percurso académico, não posso deixar de agradecer a algumas pessoas que contribuíram de uma forma ou de outra para a realização da presente dissertação.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores. Ao professor Luís Santos Araújo pelo apoio incansável durante todo o trabalho realizado, pela sua disponibilidade, muitas vezes fora do horário laboral no apoio à resolução de problemas com o equipamento e por todos os ensinamentos passados. Ao professor Paulo Coelho por todos os ensinamentos, não só durante a execução da presente dissertação, mas também durante o meu percurso académico, todo o apoio dado e por me ter levado mais além do que eu me achava capaz.

Expresso também o meu agradecimento ao Sr. José António por todo o trabalho executado durante a fase de ensaios, por vezes fora do horário laboral. Tenho a certeza que não me seria possível chegar tão longe se não fosse o seu apoio.

A todos os meus amigos e colegas de faculdade, em especial à Sara, ao João, à Carolina e à Rita, obrigada por todas as memórias criadas durante todos estes anos. Foi um prazer partilhá-las com vocês.

Aos meus amigos de sempre, em especial à Verónica e à Lisa por estarem sempre lá. Mesmo longe, estão sempre comigo!

À minha Família, não há palavras que possam expressar a minha gratidão por todos os valores que adquiri. Gostaria de tecer um agradecimento especial à minha Mãe por ser a Mulher que é e por ter permitido que eu pudesse realizar o meu percurso académico. Ao meu Irmão pela sua dedicação, tenacidade e resiliência, que sempre serviram de exemplo para mim. Por fim, ao meu Pai que apesar de já não estar comigo fisicamente, estará sempre na minha mente. Obrigada por me tornarem na pessoa que sou hoje.

Por fim, mas não menos importante, gostaria de agradecer ao meu namorado por ter acreditado em mim, mesmo quando eu própria não acreditava. Por trazer sempre luz aos meus dias de escuridão, por estares lá...SEMPRE! Obrigada não chega, mas... obrigada.

## RESUMO

A Universidade de Coimbra tem vindo a desenvolver trabalho experimental de caracterização do comportamento mecânico de diversas areias, entre as quais a areia de Hostun, uma areia francesa muito utilizada em estudos relacionados com os fenómenos resultantes de problemas de liquefação por ser considerada um solo bastante representativo do comportamento da areia genérico. A presente dissertação tem como principal objetivo comparar os resultados obtidos através dos ensaios realizados no HCA sobre a areia de Hostun com investigações de outros autores para o mesmo material resultantes da realização de ensaios realizados em equipamentos triaxiais convencionais, nomeadamente as investigações realizadas na Universidade de Coimbra. Para tal, realizaram-se ensaios de torção em amostras soltas, seis ensaios monotónicos e três ensaios cíclicos, com tensões efetivas de 100 kPa e 200 kPa utilizando o *Hollow Cylinder Apparatus* (HCA) para caracterizar o comportamento tensão-deformação desta areia tanto em condições drenadas como não drenadas. Este equipamento permite não só caracterizar a resposta da areia no domínio das pequenas deformações, mas também aplicar trajetórias de tensões pouco convencionais.

Na primeira fase do trabalho elaborado insere-se a uniformização de um processo de preparação de amostras obtidas por via da deposição gravitacional por via seca. Esta descrição é complementada com a apresentação do processo utilizado para a execução de ensaios no HCA, desde a fase de preparação da amostra até à fase de corte. Os dados obtidos do trabalho laboratorial concretizado resultam de ensaios sobre amostras cilíndricas ocas com uma densidade relativa de 40% e cujas dimensões são  $60D_i:100D_o:200H$  (mm), utilizando instrumentação local e global previamente calibrada para permitir um melhor conhecimento da resposta da areia.

Dos resultados obtidos, observou-se que as amostras sob condições drenadas sujeitas ao corte monotónico apresentaram um comportamento contrativo na fase inicial do ensaio, passando a dilatar, concluindo-se que a amostra atingiu o estado de transformação de fase. As amostras não drenadas sobre as mesmas condições também atingiram o estado de transformação de fase, dado que se pode observar a existência de uma tensão efetiva mínima. Dos ensaios cíclicos depreendeu-se que a amostra de areia quando sujeita a um carregamento cíclico sob condições não drenadas apresenta uma degradação de rigidez ao longo de cada ciclo. Já no ensaio cíclico drenado ocorre um aumento da rigidez derivado do adensamento da amostra a cada ciclo.

## **ABSTRACT**

The Geotechnical Laboratory of University of Coimbra has been developing experimental work on the characterization of the response of different sands, including a wide range of triaxial testing on Hostun sand. Hostun sand is a french sand that has been used in various studies related with liquefaction because it represents the typical behaviour of sands. To complement the characterization of the behaviour of Hostun sand monotonic and cyclic tests were performed to analyse the characteristics of the stress-strain behaviour of this sand in drained and undrained tests carried out in a Hollow Cylinder Apparatus, HCA. This equipment allows not only to characterize the sand response in the small range of deformations, but also to apply unconventional stress paths.

The first stage of the research refers to the laboratory work performed to obtain uniform air-pluviated samples. In the present dissertation the process used for the execution of HCA tests is presented, from the sample preparation stage to the shear stage. The data collected from the laboratory work resulted from torsional tests on hollow cylindrical samples whose dimensions are 60Di:100Do:200H (mm) with 40% of relative density, using local and global instrumentation previously calibrated to allow a better evaluation of the sand's response.

From the results obtained, it can be concluded that the monotonic tests in samples under drained conditions contract during the initial stage of the test. As the samples reach the phase-transformation state, they start to dilate. The undrained samples under the same conditions also reached the phase-transformation state, which is defined when the path reaches a minimum effective stress. When a sand sample is subjected to a cyclic loading under undrained conditions, the small strain stiffness decreases significantly in each cycle. However, when subjected to a cyclic loading under drained conditions it shows an increment of the small strain stiffness that can be explained by the consolidation of the sample in each cycle.

---

## ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Enquadramento Geral .....	1
1.2.	Objetivo Geral da Dissertação .....	1
1.3.	Estrutura da Dissertação .....	2
2.	CARACTERIZAÇÃO DA AREIA.....	3
2.1.	Resposta Sob Ações Monotónicas .....	3
2.1.1.	Rigidez Inicial .....	3
2.1.2.	Degradação da rigidez .....	6
2.1.3.	Estado Crítico ou Estado Estável.....	7
2.1.4.	Estado Quase Estável e Estado de Transformação de Fase.....	8
2.1.5.	Parâmetro de Estado .....	9
2.2.	Resposta Cíclica da Areia .....	10
2.2.1.	Rigidez inicial.....	10
2.2.2.	Degradação da rigidez .....	11
2.2.3.	Liquefação .....	11
2.2.4.	Carregamentos cíclicos em condições drenadas.....	14
2.3.	Caso particular: areia de Hostun .....	14
2.3.1.	Resposta da areia de Hostun para pequenas deformações.....	15
2.3.2.	Resposta da areia de Hostun para médias e grandes deformações .....	16
2.4.	Considerações Finais .....	19
3.	HOLLOW CYLINDER APPARATUS MARK II.....	20
3.1.	Equipamento .....	20
3.2.	Instrumentação e calibração dos instrumentos .....	23
3.2.1.	Esforço axial e momento torsor.....	24
3.2.2.	Pressões .....	25

---

3.2.3.	Instrumentação global.....	27
3.2.4.	Instrumentação local.....	28
3.3.	Preparação de Amostras.....	31
3.4.	Saturação.....	40
3.4.1.	Saturação a baixas pressões.....	40
3.4.2.	Saturação a altas pressões.....	41
3.5.	Consolidação da amostra .....	43
3.6.	Pressupostos teóricos .....	43
3.7.	Determinação das tensões e deformações.....	44
3.8.	Não uniformidades.....	47
4.	TRABALHO LABORATORIAL DESENVOLVIDO .....	48
4.1.	Preparação da fase de ensaios .....	48
4.1.1.	Preparação do equipamento.....	48
4.1.2.	Preparação de amostras “teste”.....	49
4.2.	Ensaio monotónicos .....	50
4.2.1.	Programa experimental.....	50
4.2.2.	Resultados experimentais .....	52
4.2.3.	Resposta da areia de Hostun no domínio das pequenas deformações.....	55
4.2.4.	Estado crítico .....	58
4.2.5.	Estado de transformação de fase .....	59
4.3.	Ensaio cíclicos.....	61
4.3.1.	Programa experimental.....	61
4.3.2.	Resultados experimentais .....	62
4.3.3.	Degradação da rigidez e coeficiente de amortecimento .....	64
4.3.4.	Resposta cíclica da areia de Hostun no domínio das grandes deformações.....	65
5.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTO FUTURO.....	67
5.1.	Conclusões .....	67
5.2.	Desenvolvimento futuro .....	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	69

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Curva de degradação da rigidez genérica [Adaptado de Atkinson (2000)].	3
Figura 2.2 - Representação gráfica do módulo de distorção inicial, tangente e secante (Araújo Santos, 2015).	7
Figura 2.3 - Comportamento drenado de areias saturadas para a mesma tensão de confinamento e diferentes densidades relativas (Adaptado de <a href="http://nptel.ac.in/courses/105103097/50">http://nptel.ac.in/courses/105103097/50</a> ).	8
Figura 2.4 - Estado quase estável na areia de Toyoura [Adaptado de Ishihara (1996)].	9
Figura 2.5 - Representação esquemática do parâmetro de estado [Adaptado de Been e Jefferies (1988)].	9
Figura 2.6 - Representação gráfica do ciclo histerético tensão-deformação e os seus parâmetros (Adaptado de Kramer, 1996).	10
Figura 2.7 - Localização da gama de valores suscetível a sofrer de liquefação por fluxo (Adaptado de Kramer (1996)).	12
Figura 2.8 - Localização da gama de valores suscetível a sofrer de mobilidade cíclica (Adaptado de Kramer (1996)).	12
Figura 2.9 - Distribuição granulométrica da areia de Hostun e sua comparação com outras areias [Adaptado de Azeiteiro et al. (2017)].	14
Figura 2.10 - Rigidez máxima da areia de Hostun [Azeiteiro et al. (2017)].	16
Figura 2.11 – Estado de transformação de fase segundo o parâmetro de estado (Azeiteiro et al., 2017).	17
Figura 2.12 - Ensaio drenado de compressão e extensão da areia de Hostun: (a): tensão-extensão; (b) extensão volumétrica- extensão axial (Azeiteiro et al., 2017).	18
Figura 2.13 - Ensaio não drenado de compressão e extensão da areia de Hostun: (a): tensão-extensão; (b) extensão volumétrica- extensão axial; (c) Evolução da pressão da água nos poros com a extensão axial (Azeiteiro et al., 2017).	18
Figura 2.14 - Possível linha do estado crítico para a areia de Hostun (Azeiteiro et al., 2017).	19
Figura 3.1 - (a) Estrutura de reação; (b) campânula; (c) colocação da campânula com recurso a ponte-grua.	20
Figura 3.2 - (a) Pedestal; (b) tubos de entrada e saída de água.	21
Figura 3.3 - (a) Atuador P1; (b) atuador P4.	21
Figura 3.4 - (a) Atuador P2; (b) atuador P3; (c) CRSP's.	22
Figura 3.5 - (a) Célula de carga com o varão de extensão aparafusado; (b) placa de topo com os potes aparafusados; (c) parafusos mergulhados na resina.	22

---

Figura 3.6 - (a) Boxes; (b) interface ar/água da amostra; (c) LVDT; (d) interface ar/água da câmara externa; (e) interface ar/água da câmara interna. ....	23
Figura 3.7 - (a) Quadro de controlo; (b) Interface pressão/sucção. ....	23
Figura 3.8 - Célula de carga: (a) equipamento; (b) calibrada à compressão; (c) calibrada à torção. ....	25
Figura 3.9 - Calibração da célula de carga: (a) load; (b) torque. ....	25
Figura 3.10 - Transdutores de pressão: (a) <i>inCP</i> ; (b) <i>outCP</i> ; (c) <i>back</i> ; (d) <i>topBack</i> . ....	26
Figura 3.11 - (a) Calibrador DH Budenberg; (b) Pesos calibrados. ....	26
Figura 3.12 - Calibração dos transdutores de pressão. ....	26
Figura 3.13 - Transdutor de: (a) deslocamento axial; (b) deslocamento angular. ....	27
Figura 3.14 - Calibração do transdutor de: (a) deslocamento axial; (b) deslocamento angular. ....	27
Figura 3.15 - Medidor volumétrico: (a) <i>sVG</i> ; (b) <i>inCV</i> ; (c) calibração dos medidores volumétricos. ....	28
Figura 3.16 - Retas de calibração da instrumentação global: (a) transdutores de deslocamento; (b) medidores volumétricos. ....	28
Figura 3.17 - Instrumentação aplicada na amostra. ....	29
Figura 3.18 - (a) Eletrónivel biaxial; (b) eletrónivel uniaxial; (c) suporte de calibração; (d) calibração à deformação axial. ....	30
Figura 3.19 - (a) Calibração do LVDT; (b) calibração do sensor de proximidade; (c) elementos constituintes do refletor de sinal; (d) refletor de sinal. ....	31
Figura 3.20 - Retas de calibração da instrumentação local: (a) eletrólitos biaxiais à compressão; (b) eletrólitos biaxiais à torção e eletrólito uniaxial; (c) LVDT; (d) sensores de proximidade. ....	31
Figura 3.21 – Fase 2: (a) Membrana interna e <i>o-ring</i> interno da base; (b) pedestal; (c) molde interno; (d) aplicação da membrana interna e do molde interno; (e) aplicação da membrana externa; (f) molde externo; (g) aplicação do molde externo; (h) membrana externa dobrada sobre o molde externo. ....	34
Figura 3.22 – Fase 3: (a) Membrana interna dobrada sobre o molde interno; (b) material utilizado para a pluviação seca; (c) aplicação do material no HCA; (d) amostra logo após a pluviação; (e) amostra rasada com recurso a um aristo; (f) retirada de resíduos com recurso a um pincel; (g) amostra rasada. ....	35
Figura 3.23 – Fase 4: (a) Colocação do esticador de <i>o-rings</i> com 2 <i>o-rings</i> ; (b) placa de topo; (c) membranas externa e interna dobradas sobre a placa de topo; (d) remoção da peça de topo do molde interno; (e) remoção da primeira parte do molde interno; (f) remoção da segunda parte do molde interno; (g) remoção da terceira parte do molde interno; (h) aplicação da tampa da placa de topo; (i) aplicação do varão de extensão e dos potes; (j) amostra após o desmonte do molde externo; (l) preparação da resina; (m) posição de ensaio. ....	38
Figura 3.24 – Fase 5: (a) Esquema da instalação da instrumentação local (Adaptado de Minh, 2006; Araújo Santos, 2015); (b) instalação de toda a instrumentação local. ....	39

---

---

Figura 3.25 – Fase 6: (a) Colocação da campânula; (b) enchimento da câmara do HCA; (c) colocação do cabo da célula de carga. ....	40
Figura 3.26 - Representação esquemática das variáveis $d_{eixo}$ e braço. ....	45
Figura 4.1 - Fuga: (a) Ponto da fuga; (b) Base do pilar. ....	48
Figura 4.2 - Placas furadas para pluviação: (a) Amostras soltas; (b) Amostras medianamente densas; (c) Amostras densas. ....	50
Figura 4.3 - Extensão volumétrica-deformação angular dos ensaios drenados: (a) DMTT_40_100_1; (b) DMTT_40_100_3; (b) DMTT_40_200_1. ....	52
Figura 4.4 - Tensão-deformação dos ensaios drenados: (a) DMTT_40_100_1; (b) DMTT_40_100_3; (b) DMTT_40_200_1. ....	53
Figura 4.5 - Morfologia da amostra após os ensaios drenados: (a) DMTT 40_100_1; (b) DMTT 40_100_3; (c) DMTT 40_200_1. ....	53
Figura 4.6 – Trajetória de tensões: (a) UMTT 40_100_1; (b) UMTT 40_200_1; (c) UMTT 40_200_2. ....	54
Figura 4.7 - Tensão-deformação dos ensaios não drenados: (a) UMTT 40_100_1; (b) UMTT 40_200_1; (c) UMTT 40_200_2. ....	54
Figura 4.8 - Variação da pressão intersticial-deformação dos ensaios não drenados: (a) UMTT 40_100_1; (b) UMTT 40_200_1; (c) UMTT 40_200_2. ....	54
Figura 4.9 - Morfologia da amostra após os ensaios ensaios: (a) UMTT 40_100_1; (b) UMTT 40_200_1; (c) UMTT 40_200_2. ....	55
Figura 4.10 - Determinação da rigidez inicial, $G_0$ dos ensaios não drenados: (a) DMTT_40_100_1; (b) DMTT_40_100_3; (c) DMTT_40_200_1. ....	55
Figura 4.11 - Determinação da rigidez inicial, $G_0$ dos ensaios não drenados: (a) UMTT_40_100_1; (b) UMTT_40_200_1; (c) UMTT_40_200_2. ....	56
Figura 4.12 - Rigidez máxima normalizada em função da tensão efetiva normalizada (Adaptado de Azeiteiro et al., 2017). ....	57
Figura 4.13 - Degradação de rigidez: (a) DMTT 40_100_1; (b) DMTT 40_100_3; (c) DMTT 40_200_1; (d) UMTT 40_100_1; (e) UMTT 40_200_1; (f) UMTT 40_200_2. ....	58
Figura 4.14 - Índice de vazios em função da tensão efetiva e possível LEC proposta por Azeiteiro et al. (2017). ....	59
Figura 4.15 - Razão de tensões no ETF em função do parâmetro de estado. ....	60
Figura 4.16 - Inclinação da LTF dos ensaios monotônicos não drenados. ....	61
Figura 4.17 - Ensaio DCTT 40_100_1: (a) Extensão volumétrica-deformação; (b) Tensão-deformação. ....	63
Figura 4.18 - Ensaio UCTT 40_200_1: (a) Trajetória de tensões; (b) tensão-deformação; (c) variação da pressão intersticial-deformação. ....	63
Figura 4.19 – UCTT 40_200_2: (a) Tensão-deformação; (b) evolução das tensões com o tempo de ensaio. ....	64
Figura 4.20 - DCTT 40_100_1: (a) Primeiro ciclo; (b) décimo ciclo; (c) último ciclo. ....	64

---

Figura 4.21 - DCTT 40_100_1: (a) Módulo de rigidez secante; (b) Coeficiente de amortecimento. ....	65
Figura 4.22 - UCTT 40_200_1: (a) Primeiro ciclo; (b) terceiro ciclo; (c) quinto ciclo. ....	65
Figura 4.23 - UCTT 40_200_1: (a) Módulo de rigidez secante; (b) coeficiente de amortecimento. ....	65
Figura 4.24 - Trajetória de tensões do ensaio UCTT 40_200_1. ....	66

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Constantes de correlação para diversas areias [Adaptado de Benz (2007)].....	6
Quadro 2.2 - Variáveis que afetam o coeficiente de amortecimento de um solo arenoso [Adaptado de Tabora (2011)]. .....	11
Quadro 2.3 - Características da areia de Hostun em diversas instituições [Adaptado de Azeiteiro et al. (2017)]. .....	15
Quadro 3.1 - Implicações no estado de tensão e de deformação [Adaptado de Araújo Santos (2015)]. .....	44
Quadro 4.1 - Densidade relativa dos ensaios de preparação de amostras realizados fora do HCA. ....	50
Quadro 4.2 - Ensaios monotônicos realizados e respectivas condições iniciais. ....	51
Quadro 4.3 - Rigidez inicial obtida nos ensaios realizados. ....	56
Quadro 4.4 - Índice de vazios e tensão média efetiva finais de todos os ensaios de corte monotônico. ....	58
Quadro 4.5 – Índice de vazios e tensão média efetiva no ETF de todos os ensaios de corte monotônico. ....	60
Quadro 4.6 – Ângulo de resistência ao corte mobilizado no ETF.....	61
Quadro 4.7 - Ensaios cíclicos realizados e respectivas condições iniciais.....	62

## SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

### Alfabeto Latino

A	Constante material
$A_{\text{ciclo}}$	Área do ciclo histerético
axDT	Deslocamento axial
axEL1	Deslocamento axial medido pelo eletrólito 1
axEL1 <sub>0</sub>	Deslocamento axial inicial medido pelo eletrólito 1
axEL2	Deslocamento axial medido pelo eletrólito 2
axEL2 <sub>0</sub>	Deslocamento axial inicial medido pelo eletrólito 2
B	Grau de saturação da amostra
back	Pressão intersticial
BottomBP	Transdutor de pressão de água nos poros na base da amostra
braço	Distância entre o transdutor do deslocamento angular e o veio central do HCA
$C_U$	Coefficiente de uniformidade
$D_0$	Diâmetro externo do molde do HCA
$D_{50}$	Diâmetro ao qual corresponde 50% de partículas passadas
$d_e$	Diâmetro externo
$d_{\text{eixo}}$	Distância do eixo do veio central do HCA ao transdutor do deslocamento angular
$D_i$	Diâmetro interno do molde do HCA
$d_i$	Diâmetro interno
$D_r$	Densidade relativa da amostra
e	Índice de vazios
$e_0$	Índice de vazios inicial
$e_{0,\text{ref}}$	Índices de vazios inicial de referência
$e_{\text{cr}}$	Índice de vazios no estado crítico
$e_{\text{máx}}$	Índice de vazios máximo
$e_{\text{min}}$	Índice de vazios mínimo
f	Frequência no ensaio
f(e)	Função do índice de vazios
G	Módulo de rigidez
$G_0$	Módulo de rigidez inicial

---

$G_{0.7}$	Módulo de rigidez reduzido a 70%
$G_{0,ref}$	Módulo de rigidez inicial de referência
$G_{max}$	Módulo de rigidez máximo
$G_s$	Densidade das partículas sólidas
$G_{sec}$	Módulo de rigidez secante
$G_{tan}$	Módulo de rigidez tangente
H	Altura da amostra
$H_0$	Altura inicial da amostra
inCP	Transdutor de pressão da câmara interna
inCV	Medidor volumétrico da câmara interna
inLVDT	LVDT instalado na câmara interna
IP	Índice de plasticidade
k	Constante material
load	Esforço axial de compressão e de extensão
m	Constante material
$m_{areia}$	Massa da areia
$M_t$	Momento torsor
N	Número de ciclos
outCP	Transdutor de pressão da câmara externa
$p'$	Tensão média efetiva
$p'_0$	Tensão média efetiva inicial
$p'_{0,ref}$	Tensão média efetiva inicial de referência
$p'_{cr}$	Tensão média efetiva no estado crítico
$p'_{ref}$	Tensão média efetiva de referência
$p_0$	Pressão externa
$p_i$	Pressão interna
prox1	Sensor de proximidade 1
prox2	Sensor de proximidade 2
prox3	Sensor de proximidade 3
$q_0$	Tensão de desvio inicial
q	Tensão de desvio
$r_o$	Raio externo
$r_{o,0}$	Raio externo inicial
$r_i$	Raio interno
$r_{i,0}$	Raio interno inicial
sVG	Medidor volumétrico da amostra
topBP	Transdutor de pressão de água nos poros no topo da amostra
torque	Designação da célula de carga para o esforço de torção
trDT	Deslocamento angular

---

---

$trDT_0$	Deslocamento angular inicial
$trEL1$	Eletronível biaxial 1
$trEL2$	Eletronível biaxial 2
$trEL3$	Eletronível uniaxial 1
$u$	Pressão de água nos poros
$u_0$	Pressão de água nos poros inicial
$u_o$	Deformação radial externa
$u_i$	Deformação radial interna
$V_0$	Volume inicial
$V_{amostra}$	Volume da amostra
$W$	Esforço axial no HCA
$W$	Máxima energia elástica armazenada por unidade de volume
$w$	Deformação axial
$-x$	Constante material
$z$	Profundidade

### Alfabeto Grego

$\gamma$	Distorção
$\gamma_0$	Distorção inicial
$\gamma_{0.7}$	Distorção existente para uma redução de rigidez a 70%
$\gamma_d$	Peso volúmico seco do solo
$\gamma_{máx}$	Distorção máxima
$\gamma_w$	Peso volúmico da água
$\gamma_{z\theta}$	Distorção média segundo o plano $z\theta$
$\Delta W$	Energia dissipada
$\epsilon_a$	Extensão axial
$\theta$	Deformação angular da amostra em radianos
$\theta_{ref}$	Deformação angular de referência
$\lambda$	Parâmetro da regressão polinomial
$\xi$	Coefficiente de amortecimento
$\phi$	Ângulo de resistência ao corte
$\psi$	Parâmetro de estado
$\Delta h$	Varição de altura da amostra
$\Delta r_o$	Varição do raio externo da amostra
$\Delta r_i$	Varição do raio interno da amostra
$\Delta s_{VG}$	Varição volumétrica da amostra
$\Delta u$	Varição da pressão da água nos poros
$\Delta \theta$	Varição da deformação angular

---

$\Delta\sigma$	Variação da tensão total
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	Extensão segundo as direções principais
$\varepsilon_r$	Extensão radial média
$\varepsilon_s$	Deformação
$\varepsilon_v$	Extensão volumétrica
$\varepsilon_z$	Extensão axial média
$\varepsilon_\theta$	Extensão circunferencial média
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensões segundo as direções principais
$\sigma_r$	Tensão total radial
$\sigma_z$	Tensão total vertical
$\sigma_\theta$	Tensão total
$\tau$	Tensão tangencial
$\tau_0$	Tensão tangencial inicial
$\tau_{z\theta}$	Tensão tangencial segundo o plano $z\theta$

### Abreviaturas

A/W	<i>Air/Water</i>
CRSP	<i>Constant Rate of State Pump</i>
DCTT	<i>Drained Cyclic Torsional Test</i>
DMTT	<i>Drained Monotonic Torsional Test</i>
DRN	Deformação Radial Nula
ENPC	<i>École Nationale des Ponts et Chaussées</i>
ENTPE	<i>École Nationale des Travaux Publics de l'État</i>
EQE	Estado Quase Estável
ETF	Estado de Transformação de Fase
HCA	<i>Hollow Cylinder Apparatus</i>
INPG	<i>Institute Polytechnique de Grenoble</i>
IP	Índice de plasticidade
LEC	Linha do estado crítico
LLF	Linha da liquefação por fluxo
LVDT	<i>Linear Variable Displacement Transducer</i>
OCR	Grau de sobreconsolidação
SI	Sistema Internacional de Unidades
UC	Universidade de Coimbra
UCTT	<i>Undrained Cyclic Torsional Test</i>
UMTT	<i>Undrained Monotonic Torsional Test</i>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Enquadramento Geral

As primeiras teorias relativas ao estudo de solos granulares datam da primeira metade do século XX. Casagrande (1936) estudou a resposta destes solos para amostras soltas e densas quando sujeitas a ensaios de corte, concluindo que a mesma areia tem comportamentos diferentes, dependendo da sua densidade relativa. Ao longo dos tempos, foram realizados diversos trabalhos de investigação sobre o comportamento de solos arenosos provenientes de diversos locais cujas características físicas e mecânicas diferem de areia para areia. Por exemplo, Coop e Atkinson (1993) estudaram o comportamento de três areias distintas: Ham River, Dog’s Bay e Granito decomposto, Been et al. (1991) utilizaram a areia de Erksak para caracterizar o estado crítico de solos granulares, Ishihara (1996) utilizou a areia de Toyoura para caracterizar a resposta da areia quando sujeita a carregamentos dinâmicos. Fazendo uma análise de publicações anteriores, pode concluir-se que, genericamente, as areias se comportam da mesma forma. No entanto existem detalhes no comportamento de cada areia que são importantes e o seu estudo é essencial para a verdadeira compreensão dos efeitos a que estes solos estão sujeitos.

Nos estudos anteriormente citados, entre tantos outros, foram utilizados diversos tipos de equipamentos laboratoriais para simular ou repor as condições *in situ*, entre os quais se destaca, por exemplo, o *Hollow Cylinder Apparatus* (HCA). Este equipamento, além de, tal como o ensaio triaxial, permitir realizar ensaios de compressão e extensão com conhecimento das tensões principais, com medição e controlo da pressão de água nos poros, possibilita também a realização de ensaios de torção em amostras com todas as vantagens que lhe estão associadas. No entanto, a utilização do HCA acarreta um aumento da dificuldade na preparação de amostras bem como na realização dos ensaios, já que as técnicas de preparação utilizadas e o controlo do equipamento são de elevada complexidade, quando comparados com os utilizados no aparelho triaxial.

### 1.2. Objetivo Geral da Dissertação

A presente dissertação tem como objetivo principal contribuir para uma melhor compreensão do comportamento da areia de Hostun quando sujeita a diferentes tipos de carregamentos. Esta areia é uma areia proveniente de uma exploração localizada a dois quilómetros de Hostun e tem a sua origem no período do Eocénico (Flavigny, 1990)

Para tal, foram efetuados ensaios monotónicos e cíclicos em amostras de areia de Hostun reconstituídas sujeitas a diferentes tensões de consolidação e a diferentes condições de drenagem utilizando o HCA do Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Este equipamento foi fornecido pelo *Imperial College London* e a forma como ele é apresentado em laboratório deve-se ao trabalho realizado por Araújo Santos (2015). Tendo em conta a complexidade do equipamento, faz parte integrante da presente dissertação o seu estudo, abordando-se as técnicas e metodologias a aplicar, a calibração dos instrumentos a utilizar nos ensaios, bem como o possível desenvolvimento das técnicas já aplicadas. Com este estudo pretende-se dar seguimento ao trabalho desenvolvido por Azeiteiro et al. (2017) no aparelho triaxial, aplicando as metodologias e as técnicas desenvolvidas por Araújo Santos (2015) para o HCA.

### **1.3. Estrutura da Dissertação**

A estrutura da dissertação é composta pelo presente capítulo introdutório, onde se define o enquadramento geral do tema, os objetivos e a estrutura da presente dissertação.

No Capítulo 2 contextualizam-se os estudos efetuados com vista à caracterização da areia de Hostun, analisando-se os resultados obtidos por outros autores em ensaios monotónicos e cíclicos sobre os solos granulares, para diferentes condições de drenagem e níveis de deformação.

O Capítulo 3 é dedicado à descrição do equipamento, de todas as suas componentes, respetivas calibrações e metodologias de ensaio que são utilizadas na presente dissertação. Adicionalmente, são apresentadas as características físicas, mecânicas e geotécnicas da areia de Hostun.

No Capítulo 4 apresentam-se detalhadamente os resultados obtidos nos ensaios monotónicos e cíclicos. Faz-se também uma comparação entre estes resultados e os resultados já obtidos por outros autores, bem como uma comparação dos resultados correspondentes a diferentes tensões de consolidação.

Por fim, no Capítulo 5 resumem-se as principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento da presente dissertação, antevendo os futuros desenvolvimentos no estudo do comportamento de solos granulares utilizando o HCA.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA AREIA

O comportamento generalizado da areia, qualquer que seja a sua origem geológica, rege-se pelo mesmo padrão, conforme os estudos desenvolvidos por Coop e Atkinson (1993) para diversas areias de origens distintas. Assim, torna-se crucial para o estudo do comportamento da areia de Hostun uma breve revisão da resposta generalizada da areia.

### 2.1. Resposta Sob Ações Monotónicas

O estudo do comportamento monotónico de solos granulares serve para analisar a forma como os solos se comportam quando sujeitos às condições naturais. No entanto, independentemente do tipo de ação a que o solo está sujeito, interessa analisar o seu comportamento numa vasta gama de deformações. Para as pequenas deformações faz-se uma análise segundo a rigidez inicial e respetiva degradação. Para as médias e grandes deformações, analisa-se a resposta do solo granular segundo a teoria do estado crítico.

#### 2.1.1. Rigidez Inicial

O módulo de distorção,  $G$ , permite calcular a deformação de corte que o solo sofre devido a uma solitação de corte, sendo habitualmente denominado de módulo de rigidez. Este parâmetro é altamente não linear e apenas pode ser considerado praticamente constante para deformações inferiores a 0.001% (Atkinson e Sallfors, 1991), onde assume o valor máximo,  $G_0$ . O  $G_0$  é um parâmetro crucial já que a curva de degradação da rigidez do solo se inicia neste ponto. Na Figura 2.1 pode observar-se a forma genérica da curva de degradação da rigidez com a deformação.

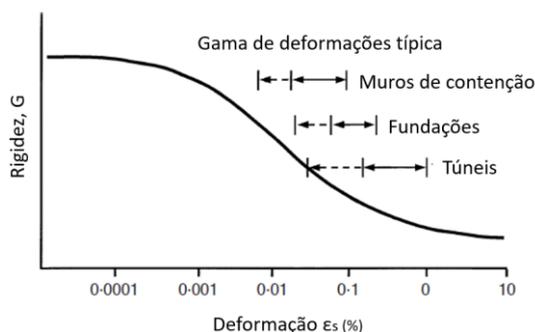


Figura 2.1 – Curva de degradação da rigidez genérica [Adaptado de Atkinson (2000)].

### Determinação da rigidez inicial

Para que se consiga determinar o  $G_0$  com rigor, são exigidos métodos que consigam gerar tão pequenas deformações quanto possível. Este parâmetro encontra-se representado na equação 2.1, onde é determinado segundo a variação da tensão de corte em relação à variação de deformação distorcional.

$$G_0 = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma} \quad (2.1)$$

O desenvolvimento da instrumentação local veio permitir a medição destas deformações em ambiente laboratorial com uma exatidão que a instrumentação global não permite (Clayton, 2011). Atualmente existem ensaios económicos de se executar, pelo que a eficiência da análise deste parâmetro melhora. Estes ensaios dividem-se em dois tipos distintos.

**Ensaio *in situ*** – Executam-se no local de estudo e baseiam-se em métodos de propagação de ondas. São eles, ensaio de refração sísmica, *cross hole seismic test* e *up/down hole seismic test*. Em todos eles são geradas ondas de corte (ondas S) e a rigidez é obtida através da velocidade de propagação destas mesmas ondas.

**Ensaio laboratoriais** – Analisa-se um provete em vez de todo o maciço em estudo. Dentro dos ensaios laboratoriais tem-se o ensaio da coluna ressonante e os *bender elements* que se baseiam em propagação de ondas, tal como os ensaios *in situ*. O ensaio de coluna ressonante baseia-se na propagação de ondas unidimensionais de forma a determinar a frequência natural do sistema para posteriormente determinar a rigidez inicial do solo. O ensaio com *bender elements* determina a velocidade das ondas de corte para posteriormente determinar a rigidez inicial. Também se pode efetuar a determinação da rigidez inicial através do *hollow cylinder apparatus* e do triaxial, no entanto estes já não determinam a rigidez inicial da amostra através de propagação de ondas. Neste caso, a rigidez inicial estima-se através da curva de tensão-deformação, com a utilização de dispositivos de medição locais que são muito menos afetados por erros de ajuste, entre outras causas. Ainda que este processo possa ser em teoria menos rigoroso, não deixa de se tornar útil para estimar a ordem de grandeza da rigidez inicial.

### Fatores que influenciam a rigidez inicial

São vários os parâmetros que influenciam a rigidez inicial do solo, destacando-se para o presente caso, o índice de vazios e a tensão de confinamento (Benz, 2007).

A diminuição do índice de vazios (ou o aumento da densidade relativa) leva ao aumento tendencial da rigidez inicial do solo (Hardin e Richart, 1963). Esta relação tem em conta a relação do índice de vazios com a velocidade de propagação das ondas de corte no solo. Segundo os referidos autores, a equação 2.2 define esta proporcionalidade para areias com grãos arredondados e  $e_0$  inferior a 0.80.

$$G_0 \propto \frac{(2.17-e)^2}{1+e} \quad (2.2)$$

Para grãos angulares e  $e_0$  superior a 0.60, aplica-se a equação 2.3.

$$G_0 \propto \frac{(2.97-e)^2}{1+e} \quad (2.3)$$

Lo Presti et al. (1993) definem ainda a equação 2.4 onde a rigidez inicial do solo é proporcional ao expoente da constante (-x) que é um parâmetro que assume um valor dependente do tipo de solo.

$$G_0 \propto e^{-x} \quad (2.4)$$

A rigidez inicial dos solos tende a aumentar com a tensão de confinamento, como foi observado por Hardin e Richart (1963) e por Vucetic e Dobry (1987). Esta correlação define-se como função de uma rigidez inicial de referência e de uma potência de tensão efetiva inicial normalizada para uma tensão efetiva de referência, conforme a equação 2.5. Nesta equação o valor m corresponde a uma constante material. Segundo Hardin e Richart (1963), esta constante tem o valor de 0.5, seja qual for o solo. No entanto, atualmente este valor, deixou de ser utilizado para solos argilosos e o m passa a tomar valores entre 0.40 e 0.55 (Benz, 2007).

$$G_0 = G_{0,ref} \times \left( \frac{p'_0}{p'_{0,ref}} \right)^m \quad (2.5)$$

Tendo como base diversos ensaios laboratoriais Hardin e Black (1968) propuseram uma expressão que correlaciona os vários efeitos referidos anteriormente. Na equação 2.6 encontra-se a expressão geral, válida para qualquer tipo de solo onde os parâmetros A, k e m são constantes dependentes do tipo de material,  $f(e)$  é uma das funções apresentadas nas equações 2.1 a 2.3, OCR é o grau de sobreconsolidação,  $p'$  é a tensão média efetiva do solo e, por fim,  $p'_{ref}$  é a tensão média efetiva de referência cujo valor é 100 kPa.

$$G_0 = A \times f(e) \times OCR^k \times \left( \frac{p'}{p'_{ref}} \right)^m \quad (2.6)$$

Na equação 2.7 encontra-se a expressão aplicada a solos granulares, que não considera o k e o OCR, pois em solos granulares o k tem valor nulo.

$$G_0 = A \times f(e) \times \left( \frac{p'}{p'_{ref}} \right)^m \quad (2.7)$$

No Quadro 2.1 encontram-se os valores das constantes de correlação para diversas areias estudadas anteriormente.

Quadro 2.1 - Constantes de correlação para diversas areias [Adaptado de Benz (2007)].

Solo testado	Parâmetros				
	$D_{50}$ (mm)	$C_u$	A	$f(e)$	m
<i>Kenya carbonate sand</i>	0.13	1.86	101-129	$e^{-0.8}$	0.45-0.52
<i>Toyoura sand subangular</i>	0.16	1.46	71-87	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	0.41-0.51
<i>Toyoura sand subangular</i>	0.19	1.56	84-104	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	0.50-0.57
<i>Silica sand subangular</i>	0.20	1.10	0	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	0.50
<i>Silica sand subangular</i>	0.20	1.70	62	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	0.50
<i>Silica sand subangular</i>	0.20	1.10	62	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	0.50
<i>Toyoura sand subangular</i>	0.22	1.35	72	$e^{-1.3}$	0.45
<i>Ham River sand subangular</i>	0.27	1.67	72-81	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	0.50-0.52
<i>Glass ballotini spheres</i>	0.27	1.28	64-69	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	0.55-0.56
<i>Hostun sand angular</i>	0.31	1.94	80	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	0.47
<i>Silica sand angular</i>	0.32	2.80	48	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	0.50
<i>Ticino sand subangular</i>	0.50	1.33	61-64	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	0.44-0.53
<i>Ticino sand subangular</i>	0.54	1.50	71	$\frac{(2.27-e)^2}{1+e}$	0.43
<i>Silica sand</i>	0.55	1.80	275	$\frac{(1.46-e)^2}{1+e}$	0.42
<i>Ticino sand subangular</i>	0.55	1.66	79-90	$e^{-0.8}$	0.43-0.48
<i>SLB sand subround</i>	0.62	1.11	82-130	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	0.44-0.53
<i>Otawa sand No. 20-30</i>	0.72	1.20	69	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	0.50
<i>Quiou carbonate sand</i>	0.75	4.40	71	$e^{-1.3}$	0.62
<i>Decompose granite</i>	1.30	≈75	45	1	0.88
<i>Hime gravel subround</i>	1.73	1.33	53-94	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	0.45-0.51
<i>Chiba ravel</i>	7.90	≈10	76	$\frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	0.50

### 2.1.2. Degradação da rigidez

Com o aumento das deformações, a rigidez degrada-se, tomando o gráfico da degradação de rigidez a forma de um S invertido, conforme a Figura 2.1. Para se estudar esta degradação de rigidez utilizam-se 2 módulos de distorção, nomeadamente tangente,  $G_{tan}$ , e secante,  $G_{sec}$ . Estes dois parâmetros podem ser definidos recorrendo à curva de tensão-deformação e determinar a inclinação da reta tangente, conforme se pode observar na Figura 2.2.

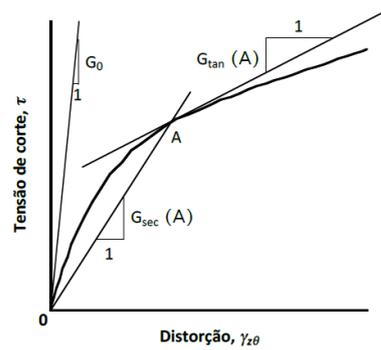


Figura 2.2 - Representação gráfica do módulo de distorção inicial, tangente e secante (Araújo Santos, 2015).

A rigidez secante e tangente também podem ser determinadas segundo as equações 2.8 e 2.9, respectivamente.

$$G_{sec} = \frac{\tau - \tau_0}{\gamma - \gamma_0} \quad (2.8)$$

$$G_{tan} = \frac{d\tau}{d\gamma} \quad (2.9)$$

### 2.1.3. Estado Crítico ou Estado Estável

Quando a areia se deforma continuamente com volume, tensão de corte e tensão de confinamento constantes, esta encontra-se no estado estável (Castro, 1975). O estado de tensão neste estado de deformação é caracterizado unicamente através do índice de vazios (Castro e Poulos, 1977), sendo a tensão de corte mobilizada denominada de resistência no estado estável ou de resistência residual (Ishihara, 1996).

Dafalias (1993) afirma que a areia num depósito pode apresentar dois tipos distintos de mecanismo entre partículas: imbricamento e enrolamento. O escorregamento tende a provocar o imbricamento das partículas, levando à diminuição do volume do depósito. Este mecanismo pode ser observado em amostras soltas, onde as partículas preenchem os espaços vazios, geralmente sem se moverem no sentido do corte. Nestas condições não se mobilizam grandes deslocamentos, sendo este comportamento habitualmente visível nas fases mais primárias do ensaio de corte. O rolamento das partículas é geralmente característico de amostras densas, levando à dilatação da amostra quando mobilizados grandes deslocamentos. As amostras densas tendem a exibir um comportamento de endurecimento onde a tensão de corte aumenta com o aumento do corte. As amostras soltas têm uma fase de amolecimento por deformação onde há uma diminuição na tensão de corte acompanhada de grandes deslocamentos. Em amostras medianamente densas, ocorrem ambos os estados da amostra. Nos momentos iniciais do ensaio ocorre o amolecimento por deformação, mas para tensões de corte mais elevadas começam a mostrar um comportamento de endurecimento por deformação.

Nas amostras soltas em condições drenadas haverá uma diminuição de volume que indica a ocorrência de rearranjo das partículas por imbricamento. Este estado da amostra é denominado de amolecimento por deformação. Nas amostras densas em condições drenadas, a dilatação ocorre devido ao mecanismo de rolamento. Este estado da amostra é denominado de endurecimento por deformação. Em amostras medianamente densas em condições drenadas, verifica-se uma contração inicial da amostra, seguida de dilatação. Na Figura 2.3 pode-se observar os três tipos de comportamento que podem ser observados em areias saturadas em condições drenadas, para a mesma tensão de confinamento.

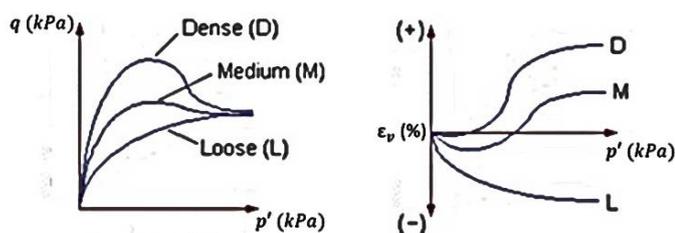


Figura 2.3 - Comportamento drenado de areias saturadas para a mesma tensão de confinamento e diferentes densidades relativas (Adaptado de <http://nptel.ac.in/courses/105103097/50>).

O estado estável e o estado crítico têm sido por diversas vezes comparados. Poulos (1981) defende que o estado crítico é atingido a grandes deformações onde estas ocorrem de forma ilimitada, estando sujeitas a um estado de tensão e volume constantes e caso se interrompa o ensaio, a amostra mantém-se no estado crítico. Tal já não acontece no estado estável, já que neste estado se o ensaio de corte for interrompido, as partículas rearranjar-se-ão de forma diferente, sendo que o estado estável só será atingido novamente se a amostra voltar a ter grandes deformações. Been et al. (1991) realizaram ensaios de compressão drenados e não drenados para amostras de areia que os fizeram concluir que o estado crítico e o estado estável seriam coincidentes, sendo que apenas diferiam no método de medição, já que o estado crítico é medido através de ensaios drenados e com amostras densas e o estado estável através de ensaios não drenados com amostras soltas. Assim, conclui-se que para fins práticos se pode assumir que estes estados são equivalentes (Jefferies e Been, 2006).

#### 2.1.4. Estado Quase Estável e Estado de Transformação de Fase

Ishihara et al. (1975) afirmam que o estado de resistência mínima coincide com o ponto denominado de transformação de fase onde o comportamento contrativo se altera e se passa a observar um comportamento dilatante. Tendo em conta os ensaios em amostras de areia de Toyoura pluviadas pelo método húmido, Ishihara (1996) observou que para uma tensão de confinamento de 0.5 MPa se observa uma queda temporária da tensão de corte acompanhada de um grande deslocamento, ocorrendo posteriormente uma mudança do comportamento da areia, nomeadamente de comportamento contrativo para dilatante. Isto pode ser observado na Figura 2.4. Ishihara (1996) conclui então que o estado quase estável (EQE) é um caso particular

do estado de transformação de fase (ETF) onde se observa uma especialmente elevada redução das tensões de corte durante um determinado período. Assim, sabe-se que toda a amostra que atinge o estado quase estável atingiu o estado de transformação de fase, mas o oposto não se verifica.

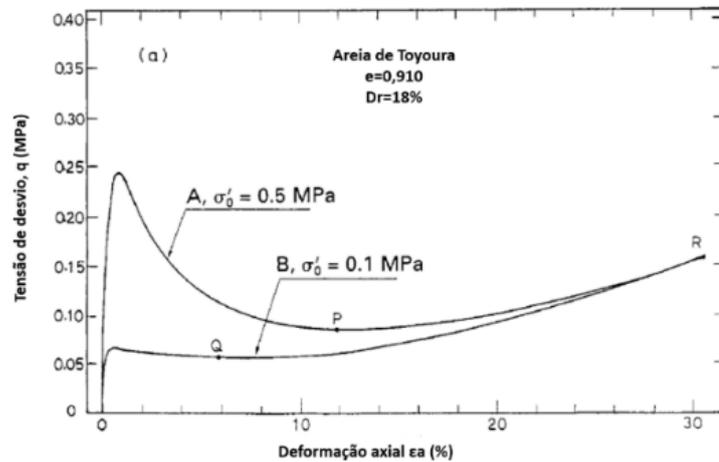


Figura 2.4 - Estado quase estável na areia de Toyoura [Adaptado de Ishihara (1996)].

### 2.1.5. Parâmetro de Estado

O parâmetro de estado deriva da influência que o índice de vazios e a tensão de confinamento têm sobre o comportamento não drenado da areia saturada (Coelho, 2007). Been e Jefferies (1985) propuseram um parâmetro de estado que tem como referência a linha do estado crítico (LEC) e define-se como a diferença entre o índice de vazios atual da amostra e o índice de vazios no estado crítico. A equação desse parâmetro de estado pode ser observada na equação 2.11.

$$\psi = e - e_{CR} \quad (2.11)$$

Quando  $\psi$  toma valores negativos o solo em comportamento dilatante, logo é considerado como não suscetível à liquefação. Para valores positivos, o solo exibe comportamento contrativo podendo assim ser suscetível à liquefação (Abreu, 2012). No entanto, a dificuldade em localizar a LEC para níveis baixos de tensão leva a que hajam problemas de aplicabilidade do parâmetro de estado (Coop, 2003). Na Figura 2.5 pode observar-se a representação gráfica do parâmetro de estado.

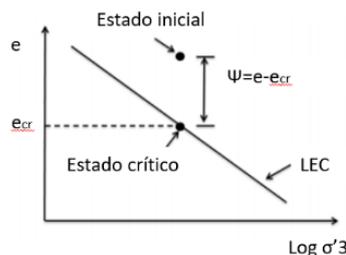


Figura 2.5 - Representação esquemática do parâmetro de estado [Adaptado de Been e Jefferies (1988)].

## 2.2. Resposta Cíclica da Areia

O estudo do comportamento dos solos granulares quando sujeitos a ações cíclicas têm especial interesse em engenharia sísmica geotécnica. Um dos principais fenômenos que se associa a este tipo de comportamento é o abalo sísmico que durante a sua ocorrência estimula o solo através de ações cíclicas com uma frequência bastante elevada, podendo eventualmente levar a outro fenômeno já mencionado anteriormente: a liquefação. Assim, interessa realizar um estudo que abranja as pequenas deformações, determinando a rigidez inicial e a sua degradação recorrendo ao ciclo histerético de tensão-deformação, bem como as grandes deformações, onde se torna crucial falar da liquefação.

### 2.2.1. Rigidez inicial

O ciclo histerético pode ser definido pelo seu gráfico tensão-deformação ou pelos parâmetros da curva tensão deformação em cada ponto do ciclo (Kramer, 1996). O módulo de rigidez tangente,  $G_{tan}$ , define a inclinação do ciclo, sendo a média de todos os  $G_{tan}$  igual ao módulo de rigidez secante,  $G_{sec}$ , definindo assim o declive da reta que une as duas extremidades do ciclo histerético (Rascol, 2009). Na Figura 2.6 pode observar-se um ciclo histerético e os seus parâmetros.

### Coefficiente de amortecimento

O coeficiente de amortecimento,  $\xi$ , define a área do ciclo e relaciona a energia dissipada durante um ciclo de carga, conforme se pode observar na Figura 2.6.

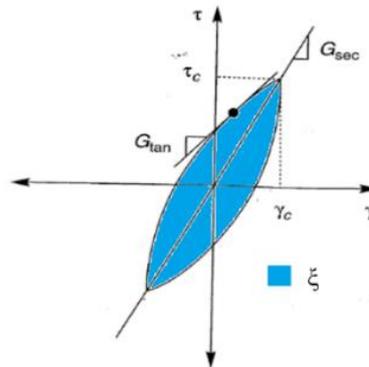


Figura 2.6 - Representação gráfica do ciclo histerético tensão-deformação e os seus parâmetros (Adaptado de Kramer, 1996).

A área do ciclo representada a azul na figura corresponde ao valor do coeficiente de amortecimento, com a máxima energia elástica armazenada por unidade de volume, consoante a equação 2.12. A energia elástica armazenada corresponde à área do triângulo formada pela origem, pela sua tensão tangencial e pela sua deformação angular.

$$\xi = \frac{1}{4 \times \pi} \frac{\Delta W}{W} = \frac{A_{ciclo}}{2 \times \pi \times G_{sec} \times \gamma_{máx}^2} \quad (2.12)$$

São vários os parâmetros que influenciam o coeficiente de amortecimento do solo destacando-se, para o presente caso, o número de ciclos de carga-descarga, o nível de deformação, o índice de vazios e a tensão de confinamento (Benz, 2007). Segundo este autor, quanto maior for o número de ciclos aos quais a areia está sujeita, maior é o coeficiente de amortecimento. O nível de deformação afeta o coeficiente de amortecimento de forma simétrica ao nível de rigidez do solo, ou seja, o coeficiente aumenta com o aumento da deformação. Em relação ao índice de vazios, observa-se que com o aumento do índice de vazios, ocorre uma diminuição do coeficiente de amortecimento. O mesmo é observado para o aumento da tensão. No Quadro 2.2 podem-se observar todas as variáveis que afetam a rigidez de um solo arenoso.

Quadro 2.2 - Variáveis que afetam o coeficiente de amortecimento de um solo arenoso [Adaptado de Taborda (2011)].

Parâmetros	Efeito sobre $\xi$
Amplitude de deformação	MI
Tensão de confinamento	MI
Índice de vazios	MI
Nº de ciclos	MI
Frequência do carregamento ( $\geq 0.1$ Hz)	I
Característica dos grãos (tamanho, forma, mineralogia, granulometria)	I
Estrutura do solo	I

MI - Muito Importante; I - Importante

### 2.2.2. Degradação da rigidez

Foram vários os autores que estudaram os resultados laboratoriais existentes sobre o comportamento da areia a pequenas deformações quando sujeita a cargas cíclicas, procurando por tendências capazes de normalizar o comportamento. Seed e Idriss (1970) estudaram os resultados laboratoriais obtidos na década de 60 para o módulo de distorção e para o coeficiente de amortecimento de areias e argilas sujeitas a diversos tipos de condições. Vucetic e Dobry (1991) estudaram os resultados laboratoriais obtidos nas décadas de 70 e 80 correlacionando o índice de plasticidade com a degradação da rigidez e o coeficiente de amortecimento. Foram analisadas areias com vários OCR, em ensaios cíclicos de coluna ressonante, corte direto simples e triaxiais. Darendeli (2001) realizou ensaios de coluna ressonante combinados com ensaios de torção em cerca de cento e dez amostras de solo intactas, obtidas de vinte locais diferentes com o objetivo de determinar a degradação de rigidez e a variação do coeficiente de amortecimento. Esta solução tem em conta cinco fatores diferentes: índice de plasticidade (IP), tensão média efetiva ( $p'$ ), grau de sobreconsolidação (OCR), frequência do ensaio ( $f$ ) e número de ciclos ( $N$ ).

### 2.2.3. Liquefação

Na gama das grandes deformações sob ações cíclicas em areias, como já foi dito na secção anterior, é importante falar de liquefação. Em carregamentos cíclicos ocorrem dois tipos de liquefação, segundo a classificação de Robertson (1994): liquefação por fluxo e mobilidade

cíclica. A liquefação por fluxo ocorre quando as tensões estáticas são superiores à resistência ao corte no estado liquefeito (Araújo Santos, 2015) e pode ocorrer devido a carregamento monotônico ou cíclico (Abreu, 2012) tendencialmente em amostras soltas (Castro, 1975). A mobilidade cíclica ocorre quando não existe nulidade da tensão efetiva e as deformações são cumulativas ao longo de cada ciclo de carregamento, podendo ocorrer tanto em amostras soltas como densas (Castro, 1975).

Durante os primeiros ciclos de carga ocorre a acumulação de excessos positivos de pressão da água nos poros, deslocando a trajetória das tensões efetivas para a esquerda. Nesta fase do comportamento tensão-deformação, está-se no domínio das pequenas deformações. Após esta fase ocorre uma redução drástica da tensão de corte, envolvendo no processo deformações elevadas por amolecimento, conduzindo à liquefação por fluxo. Tendo em conta a Figura 2.7, caso as condições iniciais do solo se encontrarem dentro da zona sombreada, existe a possibilidade de ocorrer a liquefação por fluxo.

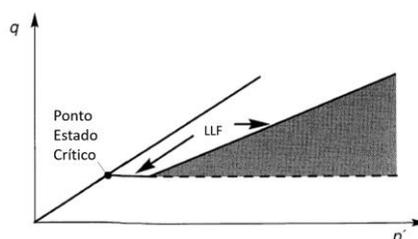


Figura 2.7 - Localização da gama de valores suscetível a sofrer de liquefação por fluxo (Adaptado de Kramer (1996)).

Chern (1985) concluiu que a formulação desenvolvida para o comportamento da areia nos ensaios monotônicos é em tudo semelhante nos ensaios cíclicos. No entanto, quando sujeita a carregamentos cíclicos, no estado crítico a areia não sofre necessariamente liquefação por fluxo, sendo este fenómeno dependente do carregamento cíclico que é aplicado. A mobilidade cíclica, pelo contrário, pode ocorrer sempre que a tensão de corte estática for inferior à resistência no estado crítico (Kramer, 1996). Na Figura 2.8 pode-se observar a zona a que correspondem as condições iniciais suscetíveis de provocar mobilidade cíclica.

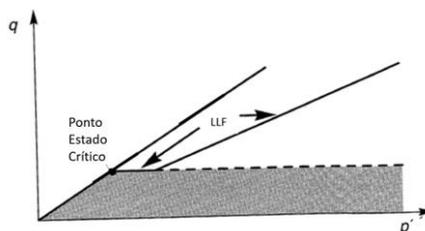


Figura 2.8 - Localização da gama de valores suscetível a sofrer de mobilidade cíclica (Adaptado de Kramer (1996)).

Os estudos realizados, nomeadamente em laboratório, demonstram que a resistência da areia à liquefação é influenciada por diversos fatores como a tensão de confinamento, a tensão de corte cíclica, o número de ciclos aplicados e o índice de vazios.

Seed e Idriss (1971) desenvolveram um método semi-empírico, posteriormente atualizado, que avalia quais as condições de carregamento necessárias para levar a areia a atingir a liquefação. Segundo Coelho (2007), o carregamento cíclico é expresso segundo a razão de tensões cíclicas, CSR, e compara-se com a razão de resistência cíclica, CRR, que define as tensões cíclicas que provocam a liquefação. Assim, a liquefação ocorre quando a razão das tensões cíclicas for superior à razão de resistência cíclica (Kramer, 1996).

A resistência da areia à liquefação depende da proximidade entre as condições iniciais do solo e a rotura (Kramer, 1996). Os fatores mais relevantes são a densidade relativa, o método de preparação da amostra, o OCR, a magnitude do sismo e as tensões de confinamento e de corte estático.

O aumento da densidade relativa, conforme mencionado anteriormente, leva ao aumento considerável da resistência à liquefação. Kramer (1996) afirma que estudos realizados comprovam que para a mesma densidade relativa, métodos de preparação da amostra diferentes levaram a resistências à liquefação diferentes. Por exemplo, recorrendo ao método de deposição gravitacional por via seca (doravante designada por pluviação seca) as resistências obtidas foram inferiores às do método de deposição gravitacional por via húmida (doravante designada por pluviação húmida). Com o aumento do grau de sobreconsolidação, OCR, a resistência à liquefação também tende a aumentar, como referido por Ishihara e Takatsu (1979). Também a magnitude do abalo sísmico condiciona o número de ciclos a que a areia pode estar sujeita antes de atingir a liquefação pelo que afeta a resistência à liquefação.

### **Deformação radial nula**

Na caracterização do comportamento não drenado de areias importa também estudar a influência das condições de confinamento. De facto, após a realização de vários ensaios de torção num HCA para diversas condições de consolidação e de restrição de deformação lateral, Ishihara (1996) conclui que a imposição de restrições à deformação radial da amostra simula de forma mais adequada maciços arenosos nivelados horizontalmente. Note-se que a livre deformação lateral da amostra simula, por sua vez, mais adequadamente terrenos ligeiramente inclinados.

A condição de deformação radial nula é imposta no ensaio de forma a reproduzir as condições às quais a amostra estaria sujeita *in situ*, impondo um estado plano de deformação ao provete. (Kim et al., 2013). Segundo o autor, existem duas formas de impor a condição de deformação radial nula: controlo vertical e controlo radial. Quando se impõe a deformação radial nula por controlo vertical, a tensão vertical altera-se de forma a manter a extensão vertical nula. Quando o controlo é feito radialmente, altera-se a pressão na câmara para manter a extensão radial nula.

#### 2.2.4. Carregamentos cíclicos em condições drenadas

A maioria dos estudos sobre a resposta cíclica de areias centra-se nas condições não drenadas, já que é nestas condições que ocorrem grandes desastres como os que ocorreram no Alasca (EUA) e em Niigata (Japão) em 1964, onde fenómenos de liquefação subsequentes aos abalos sísmicos provocaram severos danos. Este tipo de sollicitação pode ser observado, por exemplo, nas estruturas *offshore* onde o solo de fundação apresenta um comportamento drenado sujeito à ação cíclica provocada pelas ondas do mar (Wichtmann et al., 2005). Nestas condições, as deformações apenas começam a ser significativas após um número elevadíssimo de ciclos, ao contrário do que acontece em condições não drenadas.

A resposta da areia nestas condições, é diferente da resposta em condições não drenadas. Enquanto que nos ensaios cíclicos não drenados se espera que ocorra uma degradação da rigidez, tal não acontece nos ensaios drenados. Rascol (2009) realizou ensaios cíclicos drenados na areia de Lemane e verificou que a extensão volumétrica se acumulava a cada ciclo, levando a um aumento da rigidez em cada ciclo e à diminuição do coeficiente de amortecimento.

#### 2.3. Caso particular: areia de Hostun

A areia de Hostun é uma areia francesa proveniente de Hostun, de grão fino, maioritariamente constituída por sílica e bastante estudada nas últimas décadas, sendo considerada um solo bastante representativo do comportamento da areia genérico (Flavigny, 1990). Na Figura 2.9 pode-se observar a distribuição granulométrica da areia de Hostun do Laboratório de Geotecnia da Universidade de Coimbra e a sua comparação com diversas areias.

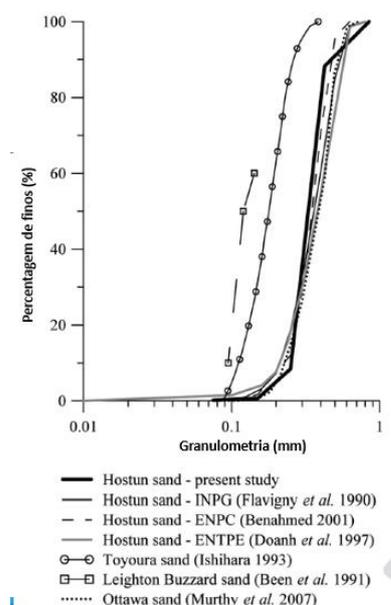


Figura 2.9 - Distribuição granulométrica da areia de Hostun e sua comparação com outras areias [Adaptado de Azeiteiro et al. (2017)].

No Quadro 2.3, podem observar-se as características da areia de Hostun segundo três entidades, nomeadamente *Institute Polytechnique de Grenoble* INPG, *École Nationale des Travaux Publics de l'État*, ENTPE e *École Nationale des Ponts et Chaussées*, ENPC, bem como as características da areia de Hostun obtidas no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Coimbra, UC, na sequência dos estudos realizados por Azeiteiro et al. (2017). Observa-se que a areia estudada por Azeiteiro et al. (2017) tem partículas com um diâmetro médio de 0.33 mm e a densidade das partículas sólidas tem o valor igual a 2.64. Observa-se também que o índice de vazios máximo é igual à unidade e o mínimo igual a 0.66 (Azeiteiro et al., 2017).

Quadro 2.3 - Características da areia de Hostun em diversas instituições [Adaptado de Azeiteiro et al. (2017)].

Parâmetro	Instituição			
	UC	INPG	ENTPE	ENPC
D <sub>50</sub> (mm)	0.33	0.30/0.35	0.38	0.33/0.38
C <sub>U</sub>	1.40	1.70/1.90	1.90	1.60/1.90
G <sub>s</sub>	2.64	2.65	2.65	2.65
e <sub>min</sub>	0.66	0.62	0.62/0.65	0.66
e <sub>máx</sub>	1.00	0.96	0.96/1.04	1.00
Forma das partículas	Subangular/Angular			

Existem diversos estudos e ensaios laboratoriais realizados sobre amostras de areia de Hostun. No entanto para a presente dissertação interessa o estudo realizado por Azeiteiro et al. (2017). Os autores analisaram o comportamento da areia de Hostun recorrendo a ensaios de propagação de ondas com *Bender Elements* em amostras com vários índices de vazios, corroborando a teoria que defende que o comportamento a pequenas deformações depende essencialmente do índice de vazios e da tensão média efetiva. Na gama das médias deformações, estes autores concluíram, a partir de ensaios de compressão monotónicos, que era possível utilizar uma abordagem do seu comportamento baseada nos parâmetros de estado.

### 2.3.1. Resposta da areia de Hostun para pequenas deformações

Azeiteiro et al. (2017) ao analisarem os resultados obtidos na gama das pequenas deformações, determinaram a rigidez máxima através da equação 2.13, que vem da equação 2.7, mas aplicada à areia de Hostun. A função do índice de vazios é expressa na equação 2.14, proposta por Hardin e Richart (1978).

$$G_0 = 293 \times f(e) \times \left( \frac{p'}{p'_{ref}} \right)^{0.49} \quad (2.13)$$

$$f(e) = \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \quad (2.14)$$

Os resultados obtidos para a rigidez da areia de Hostun foram comparados aos obtidos por Hoque e Tatsuoka (2000) e mostraram-se bastante próximos destes, evidenciando que, com o aumento da tensão média efetiva, aumenta também a rigidez do solo. Estes resultados estão representados na Figura 2.10.

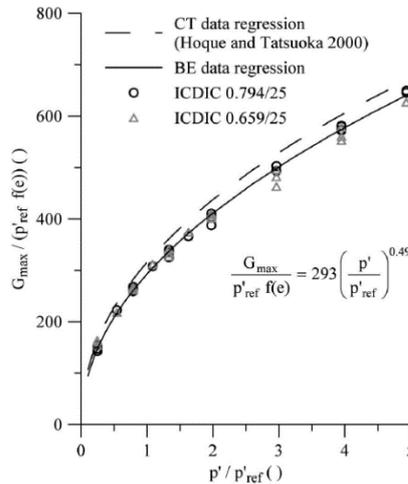


Figura 2.10 - Rigidez máxima da areia de Hostun [Azeiteiro et al. (2017)].

### 2.3.2. Resposta da areia de Hostun para médias e grandes deformações

Azeiteiro et al. (2017) consideraram três fases distintas da resposta da areia de Hostun: o estado de transformação de fase que, conforme já concluído anteriormente, define o ponto em que ocorre a mudança da resposta contrativa para dilatante, o estado correspondente ao máximo ângulo de resistência mobilizado e o estado crítico.

#### Estado de transformação de fase

O estado de transformação de fase pode ser facilmente observado nos ensaios não drenados, pois corresponde ao ponto onde a tensão média efetiva é mínima (Ishihara et al., 1975). Nos ensaios drenados torna-se mais complexo, sendo necessário determinar a dilatância bem como as extensões volumétrica e de desvio para determinar este estado (Azeiteiro et al., 2017). A dilatância pode ser calculada através da equação 2.15 que relaciona a dilatância com as deformações volumétricas plásticas sofridas pela amostra. Não sendo possível determinar diretamente as deformações plásticas, para as determinar é necessário recorrer à subtração das deformações elásticas às totais.

$$D = \frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_q^p} \approx \frac{\delta\varepsilon_v - \delta\varepsilon_v^e}{\delta\varepsilon_q - \delta\varepsilon_q^e} \approx \frac{(\delta\varepsilon_{v_{j+1}}^e - \delta\varepsilon_{v_j}^e) - (p'_{j+1} - p'_j) / K_{tan}}{(\delta\varepsilon_{q_{j+1}}^e - \delta\varepsilon_{q_j}^e) - (q_{j+1} - q_j) / (3 \times G_{tan})} \quad (2.15)$$

Na aplicação desta equação, Azeiteiro et al. (2017) assumiu que os módulos de rigidez tangentes eram constantes em todos os momentos  $j$  e que o seu valor correspondia ao seu valor máximo,  $K_{m\acute{a}x}$  e  $G_{m\acute{a}x}$ . Enquanto que o  $G_{m\acute{a}x}$  é retirado do gráfico tensão-deformação, o  $K_{m\acute{a}x}$  é determinado segundo a equação 2.16.

$$K_{m\acute{a}x} = \frac{2 \times (1 + \nu)}{3 \times (1 - 2\nu)} \times G_{m\acute{a}x} \quad (2.16)$$

Onde  $\nu$  é o coeficiente de Poisson, cujo valor utilizado por Azeiteiro et al. (2017) foi 0.18. O estado de transformação de fase é determinado pela equação 2.17, proposta por Manzari e Dafalias (1997).

$$\eta_{PTS}^{c,e} = M_{CS}^{c,e} + k_{PTS}^{c,e} \times \psi_{PTS} \quad (2.17)$$

Onde  $\psi_{PTS}$  é o parâmetro de estado e  $k_{PTS}^{c,e}$  é uma constante dependente do material no estado de transformação de fase e cujo valor difere em compressão e extensão. Assim, tem-se duas linhas do estado de transformação de fase, uma em compressão e outra em extensão. Na Figura 2.11 encontra-se representado o estado de transformação de fase em função do parâmetro de estado. Para a areia de Hostun, Azeiteiro et al. (2017) determinou o valor da constante dependente do material  $k_{PTS}$  através de regressões lineares, tendo chegado aos valores 0.94 em compressão e -0.10 em extensão.

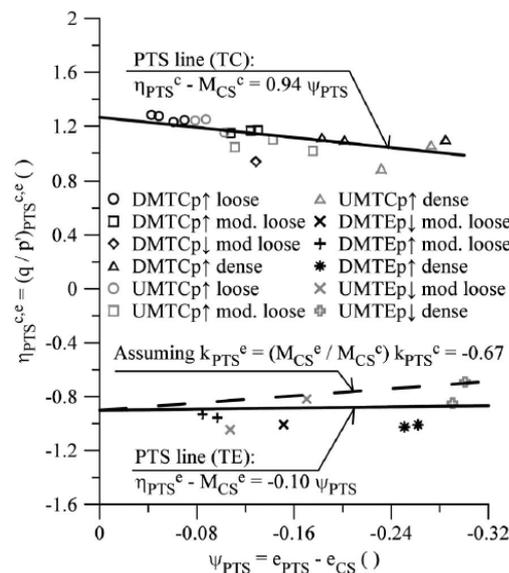


Figura 2.11 – Estado de transformação de fase segundo o parâmetro de estado (Azeiteiro et al., 2017).

### Estado crítico

Os resultados obtidos por Azeiteiro et al. (2017) encontram-se ilustrados na Figura 2.12, a partir da qual concluíram que o índice de vazios influencia bastante os resultados obtidos. De facto,

para as mesmas condições, variando apenas o índice de vazios, os resultados obtidos diferiram bastante. Por exemplo, para um índice de vazios de 0.885 e uma tensão efetiva de 80 kPa tem-se tensão de desvio máxima abaixo dos 250 kPa, já para um índice de vazios de 0.798 e para a mesma tensão efetiva tem-se uma tensão de desvio máxima acima dos 250 kPa. Em relação às extensões obtidas, verificaram que para o primeiro caso a deformação volumétrica máxima é atingida para maiores valores de extensão axial do que para o segundo caso. Como esperado, concluíram que quanto menor o índice de vazios, ou seja, quanto mais densa é a amostra, maior é a tensão de desvio máxima e as amostras tendem menos a contrair.

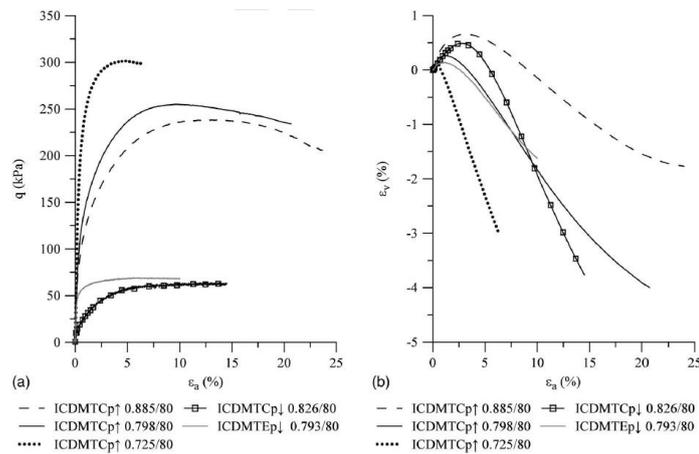


Figura 2.12 - Ensaio drenados de compressão e extensão da areia de Hostun: (a): tensão-extensão; (b) extensão volumétrica-extensão axial (Azeiteiro et al., 2017).

Torna-se também importante referir que para duas amostras com índices de vazios muito próximos, mas com tipos de trajetórias diferentes (compressão e extensão), Azeiteiro et al. (2017) verificaram que apesar da amostra sujeita a uma trajetória de compressão apresentar uma contração volumétrica maior, é a amostra sujeita a uma trajetória de extensão que atinge tensões de desvio superiores. Estes resultados estão em conformidade com os obtidos nos ensaios não drenados, representados na Figura 2.13.

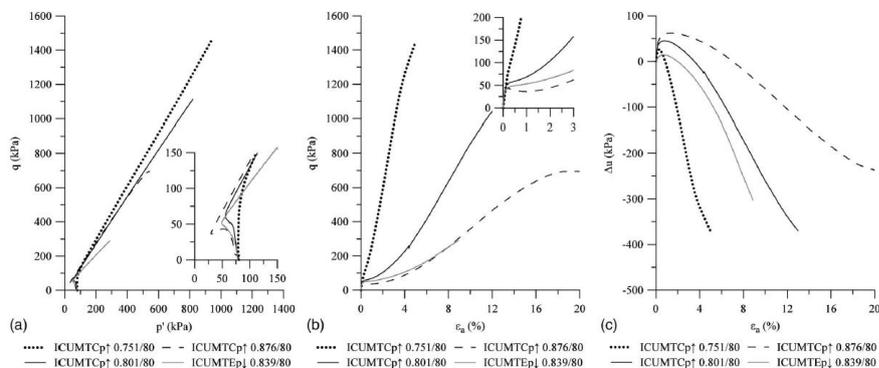


Figura 2.13 - Ensaio não drenados de compressão e extensão da areia de Hostun: (a): tensão-extensão; (b) extensão volumétrica- extensão axial; (c) Evolução da pressão da água nos poros com a extensão axial (Azeiteiro et al., 2017).

Assim, determinaram uma possível linha do estado crítico da areia de Hostun, representada na Figura 2.14, segundo a proposta de Li e Wang (1998), definida na equação 2.18, onde  $e_{0;ref}$ ,  $\lambda$  e  $\xi$  são parâmetros estimados segundo a regressão polinomial.

$$e_{cr} = e_{0;ref} - \lambda \times \left( \frac{p'}{p'_{ref}} \right)^\xi \quad (2.18)$$

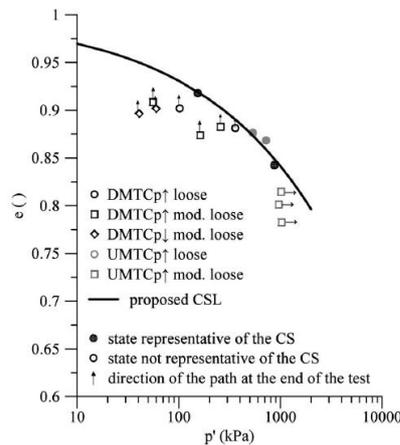


Figura 2.14 - Possível linha do estado crítico para a areia de Hostun (Azeiteiro et al., 2017).

## 2.4. Considerações Finais

Tendo em conta os estudos apresentados, prevê-se encontrar uma areia cujo comportamento se baseia no comportamento da areia genérica (dependendo principalmente do índice de vazios e da tensão média efetiva): um comportamento inicialmente instável e contrativo que se transforma num estado estável e dilatante, ainda que este tipo de comportamento não seja típico de amostras soltas.

Na presente dissertação serão comparados os resultados obtidos com as investigações anteriormente mencionadas, dando especial ênfase ao trabalho apresentado por Azeiteiro et al. (2017), pois foi realizado com a areia presente no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Coimbra, pelo que terá, sensivelmente, as mesmas características físicas, químicas e geotécnicas que a utilizada para o desenvolvimento da presente dissertação. Para tal, serão aplicadas as técnicas de ensaio de Araújo Santos (2015). Os resultados obtidos, apesar de serem comparados com os obtidos por Azeiteiro et al. (2017) não serão iguais dado que a trajetória de tensões aplicada é diferente. Enquanto que Azeiteiro et al. (2017) realizou ensaios de compressão e extensão, os ensaios realizados para a presente dissertação foram feitos segundo uma trajetória de torção.

### 3. HOLLOW CYLINDER APPARATUS MARK II

O *Hollow Cylinder Apparatus Mark II*, ou HCA, é um equipamento de ensaio laboratorial que combina, de forma independente, a aplicação de esforço axial, momento torsor, contrapressão e pressões interna e externa numa amostra cilíndrica oca, tornando assim possível controlar as três tensões principais.

O HCA do laboratório de Geotecnia da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra faz parte dos três equipamentos existentes em Portugal: existe um no Laboratório Nacional de Engenharia Civil e outro no laboratório de Geotecnia do Instituto Superior Técnico (Araújo Santos, 2015). O HCA da Universidade de Coimbra é capaz de ensaiar amostras com  $60D_i$ - $100D_0$ - $200H$  mm e  $150D_i$ - $200D_0$ - $300H$  mm. Na presente dissertação apenas foram ensaiadas amostras com as menores dimensões ( $60D_i$ - $100D_0$ - $200H$  mm).

#### 3.1. Equipamento

O HCA Mark II da Universidade de Coimbra é constituído por uma estrutura de reação em aço inoxidável, que se encontra fundada num bloco de betão através de parafusos, reforçada por quatro pilares de 50 mm de diâmetro e por dois anéis, como se pode observar na Figura 3.1(a). Todos os pontos possíveis de fuga estão vedados através da utilização de *O-rings*. Além desta estrutura de reação, tem-se também a campânula que é constituída por um cilindro de perspex (acrílico) com 45 mm de espessura e serve para fechar a câmara do HCA, conforme se pode observar na Figura 3.1(b). Devido à sua envergadura, deve-se utilizar uma ponte-grua por forma a colocar e retirar a campânula, conforme Figura 3.1(c).

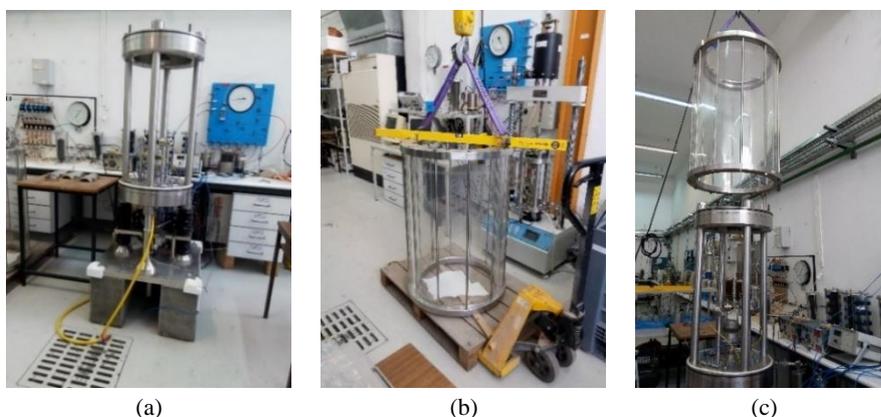


Figura 3.1 - (a) Estrutura de reação; (b) campânula; (c) colocação da campânula com recurso a ponte-grua.

No centro da câmara encontra-se o pedestal, conforme Figura 3.2 (a), que serve de base para as amostras. O pedestal é suportado pelo eixo central do HCA, onde se encontram também todas as linhas de água, nomeadamente as linhas de pressão interna (no interior da cavidade da amostra), as linhas de pressão externa (envolvente da amostra), a contrapressão e finalmente a sucção/pressão. As linhas de pressão interna e externa servem para controlar o confinamento da amostra; a contrapressão é a pressão da água nos poros da amostra e o seu valor depende do tipo de ensaio que pretendemos fazer; a linha de sucção/pressão é utilizada durante a montagem da amostra e, posteriormente, durante a fase de saturação da amostra a altas pressões. O enchimento da câmara do HCA é feito através de um tubo que liga a rede de água do laboratório à câmara. O esvaziamento é feito através de um tubo ligado diretamente ao esgoto. Ambos os tubos podem ser controlados através de torneiras existentes na base do HCA e encontram-se representados na Figura 3.2 (b).



Figura 3.2 - (a) Pedestal; (b) tubos de entrada e saída de água.

Na base do HCA encontra-se um sistema de atuadores que se encontram conectados ao veio central do HCA. De forma a normalizar a explicação, usar-se-á a mesma nomenclatura utilizada por Araújo Santos (2015). Os atuadores designados por P1 e P4 estão apresentados na Figura 3.3. O atuador P1, situado dentro do bloco de betão, é utilizado para controlar o esforço axial a que a amostra é sujeita. O esforço axial é aplicado através de um pistão que eleva uma esfera de aço encostada ao veio central, fazendo a amostra comprimir contra a placa de topo. O atuador P4 auxilia o atuador P1 fazendo o veio central descer solidário com o P1, o que se torna indispensável, nomeadamente para ensaios de extensão.

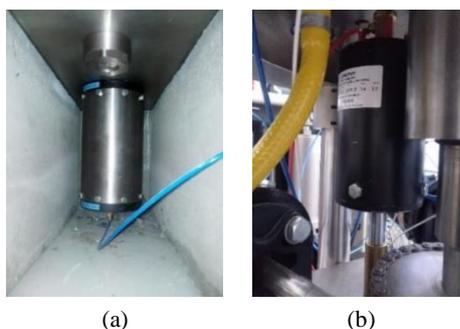


Figura 3.3 - (a) Atuador P1; (b) atuador P4.

Os atuadores P2 e P3, apresentados na Figura 3.4 (a) e Figura 3.4 (b), impõem a rotação do veio central com o auxílio de uma roda dentada, provocando assim momento torsor na amostra, sendo que a roda dentada é mantida sob pressão através do atuador P3. Os atuadores P1 e P2 podem ser controlados pelos CRSP's, que podem ser observados na Figura 3.4 (c) através de motores reguladores de impulsos.

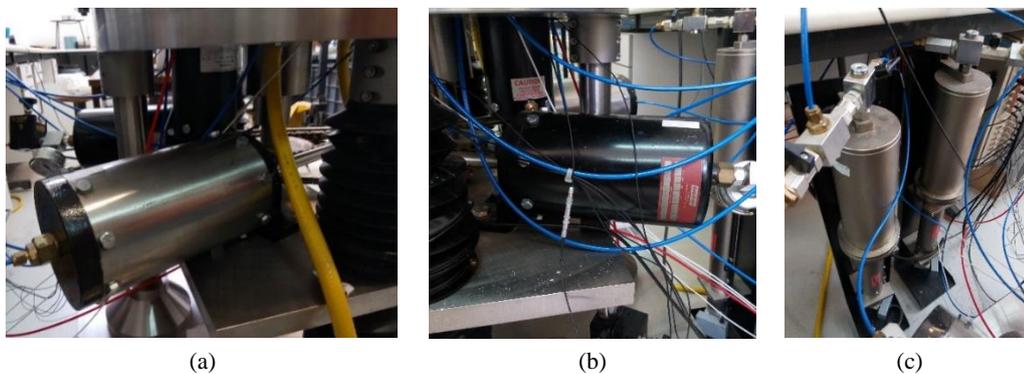


Figura 3.4 - (a) Atuador P2; (b) atuador P3; (c) CRSP's.

No anel de reforço superior encontra-se fixada a célula de carga combinada que lê o esforço axial e o momento torsor aplicados na amostra. No topo da amostra encontra-se a placa de topo que permite a introdução e medição das pressões internas da amostra. Para a célula de carga combinada conseguir ler os esforços atuantes na amostra, é ligada à placa de topo através de um varão de extensão aparafusado à célula de carga. Na placa de topo, esta fixação é feita através de resina de poliéster com 3% de catalisador vertida em quatro potes, onde posteriormente se mergulham os parafusos ligados à base do varão de extensão. Estes elementos podem ser observados na Figura 3.5.

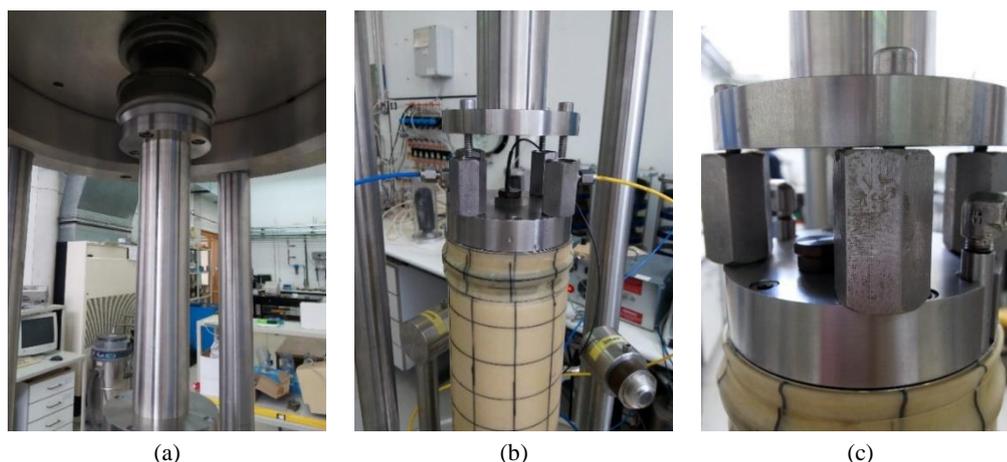


Figura 3.5 - (a) Célula de carga com o varão de extensão aparafusado; (b) placa de topo com os potes aparafusados; (c) parafusos mergulhados na resina.

O sistema de carregamento pode ser controlado de duas formas: por pressões controladas ou por extensões controladas. Este sistema inclui cinco controladores electropneumáticos, designados por *boxes* (Figura 3.6 (a)), que trabalham segundo interfaces de água/ar, permitindo o controlo dos esforços aplicados, da pressão da água nos poros e das pressões interna e externa da amostra. As *boxes*, tal como os CRSP's, são controladas através de motores reguladores de impulsos. A pressão de água nos poros é induzida através de um medidor volumétrico, sendo as variações de volume sofridas determinadas com a ajuda de um transdutor de deslocamento, LVDT, representados na Figura 3.6 (b) e Figura 3.6 (c), respetivamente). A pressão da câmara exterior e interior é medida com a ajuda de um medidor volumétrico, observados na Figura 3.6 (d) e Figura 3.6 (e), respetivamente.

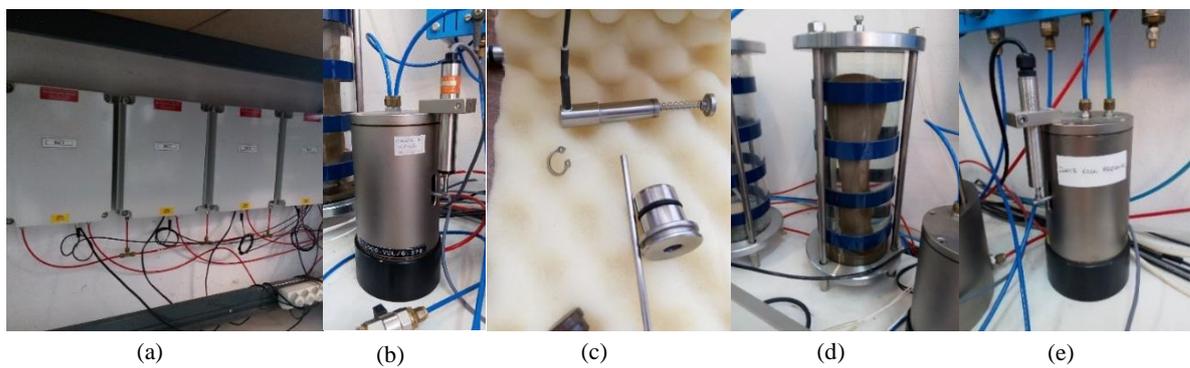


Figura 3.6 - (a) Boxes; (b) interface ar/água da amostra; (c) LVDT; (d) interface ar/água da câmara externa; (e) interface ar/água da câmara interna.

As linhas de pressão estão ligadas a um quadro de controlo que está apresentado na Figura 3.7 (a) e serve para controlar manualmente as pressões. A ele encontra-se também ligado um sistema de indução de pressão/sucção, apresentado na Figura 3.7 (b), que tem uma linha de ar comprimido independente da linha de ar comprimido do quadro de controlo.

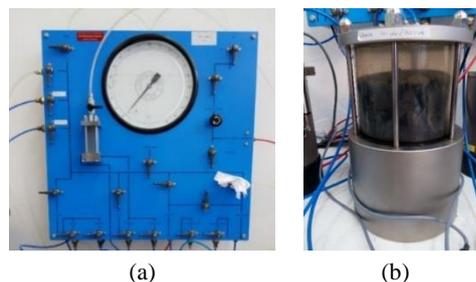


Figura 3.7 - (a) Quadro de controlo; (b) Interface pressão/sucção.

### 3.2. Instrumentação e calibração dos instrumentos

Existe uma vasta gama de medidores e controladores no HCA. De forma a obter informações sobre o comportamento da areia para pequenas deformações, teve de se instalar instrumentação local, já que a instrumentação global não fornece informação precisa para tecer conclusões

sobre o comportamento a pequenas deformações (Araújo Santos, 2015). As medições adquiridas pelos instrumentos de medição local e global são registadas num programa de controlo automático denominado de Triax<sup>®</sup> v5.2.0, sendo que cada instrumento tem uma designação corrente e uma designação utilizada pelo programa. Estas designações encontram-se definidas em detalhe em Araújo Santos (2015).

Sabe-se que o desempenho dos instrumentos de medição está inteiramente ligado à calibração dos mesmos, sendo as medições apenas válidas quando o instrumento se encontra devidamente calibrado e com a precisão de medição conhecida. Assim, a verificação da calibração torna-se num processo indispensável antes de se procederem aos ensaios laboratoriais. Verificou-se que praticamente todos os instrumentos estavam calibrados, à exceção do LVDT que foi calibrado novamente.

Para calibrar os instrumentos de medição, começou-se por verificar quais os instrumentos que não se encontravam calibrados e procedeu-se à sua respetiva calibração, cujo processo se encontra descrito na secção 3.2. Verificou-se que todos os equipamentos se encontravam calibrados, à exceção do LVDT, tendo-se procedido à sua calibração. De seguida apresentam-se as curvas de calibração de cada instrumento.

### **3.2.1. Esforço axial e momento torsor**

#### **Célula de carga combinada, *load*, *torque***

A célula de carga combinada apresentada na Figura 3.8 (a), comercializada pela Maywood Instruments Ltd, tem a capacidade de registar esforços axiais entre -6 kN e 8 kN, com uma precisão de  $\pm 1.5$  N e momentos torsores até ao valor absoluto de 400 Nm, com uma precisão de  $\pm 0.8$  Nm (Araújo Santos, 2015). Esta encontra-se instalada dentro da câmara do HCA, alinhada com o veio central e aparafusada ao anel de reforço superior. Este instrumento contém um sistema de compensação de pressão que o impede de perder desempenho durante a aplicação de altas pressões na amostra (Zdravkovic, 1996).

A calibração da célula de carga é feita ao esforço axial de compressão e de extensão (*load*) bem como ao esforço de torção (*torque*). Para o esforço axial de compressão, a célula de carga é colocada na estrutura de calibração virada para cima. Depois aparafusa-se um adaptador de aço à célula de carga que permite a ligação do suporte que irá receber as cargas para a calibração. A verticalidade das cargas aplicadas é garantida por uma esfera metálica que se coloca no centro do adaptador, onde é apoiado o suporte. A verificação à compressão é feita carregando o suporte com cargas até um valor previamente definido e efetuando, posteriormente, uma fase de descarga. Para o esforço axial de extensão o processo é semelhante, diferindo apenas a forma como a célula de carga está instalada. Araújo Santos (2015) desenvolveu um suporte onde se pode fixar a célula de carga na posição que ela toma no HCA. O suporte que receberá as cargas é aparafusado ao adaptador diretamente, sem recorrer à esfera e à parte do suporte de cor verde

que se pode observar na Figura 3.8 (b). Para calibrar à torção, a célula de carga é instalada numa plataforma que permite a aplicação de um binário de forças que provoca um momento torsor na célula de carga, conforme a Figura 3.8 (c). O processo de calibração processa-se de forma análoga à utilizada para os esforços axiais: carregamento por escalões, seguido de descarregamento igualmente por escalões. Para os três processos, por cada patamar de carga/descarga regista-se o valor em volts medidos pela célula de carga, sendo posteriormente analisados segundo uma regressão linear.

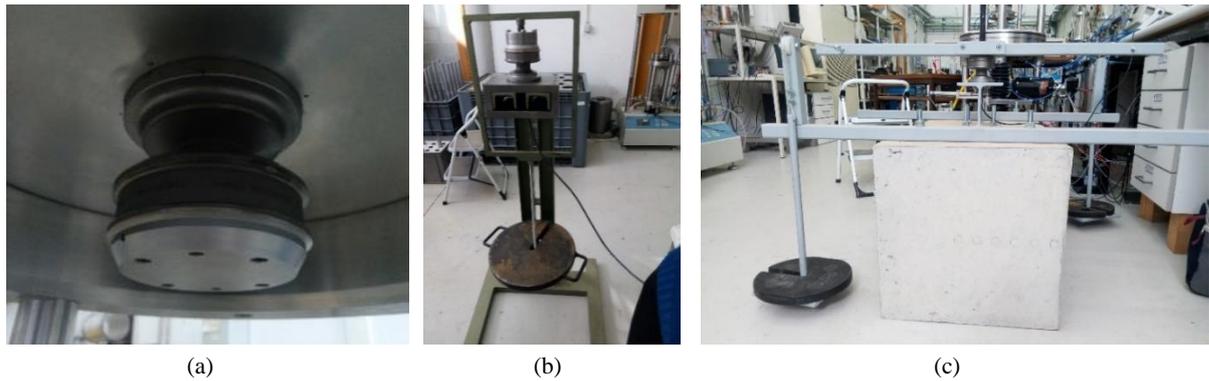


Figura 3.8 - Célula de carga: (a) equipamento; (b) calibrada à compressão; (c) calibrada à torção.

No Figura 3.9 (a) e (b) pode-se observar a reta de calibração da célula de carga para o esforço axial e para o momento torsor, respetivamente.

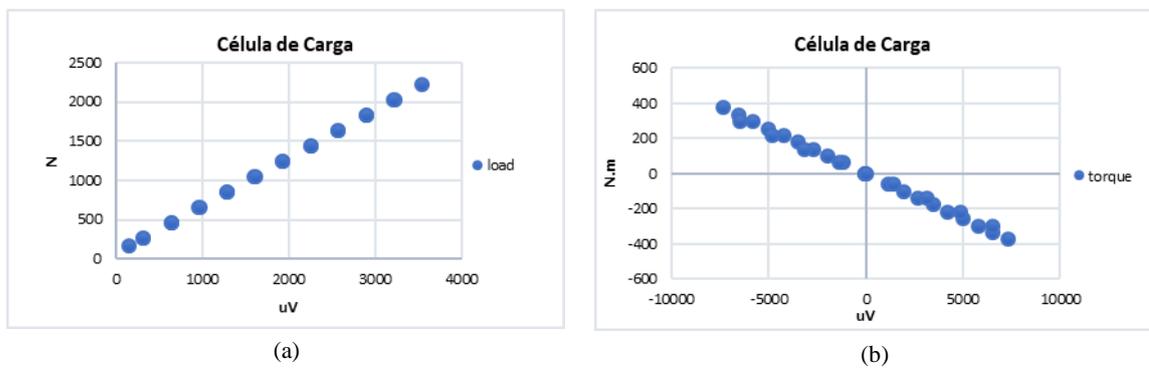


Figura 3.9 - Calibração da célula de carga: (a) load; (b) torque.

### 3.2.2. Pressões

#### Transdutores de pressão, *inCP*, *outCP*, *topBP* e *back*

Os quatro transdutores de pressão apresentados na Figura 3.10 têm uma capacidade máxima de 1000 kPa (10 bar) e uma precisão entre  $\pm 0.75$  e  $\pm 1.00$  kPa (Araújo Santos, 2015). São eles: o transdutor que mede a pressão interna da célula, ou seja, a pressão interior da amostra, *inCP*; o transdutor que mede a pressão externa da célula, ou seja, a pressão no exterior da amostra, *outCP*; o transdutor da pressão da água nos poros na base da amostra, *back*; e por fim o

transdutor da pressão de água nos poros no topo da amostra, *topBP*. Enquanto que todos podem ser medidos, apenas os três primeiros são utilizados para controlar a amostra.

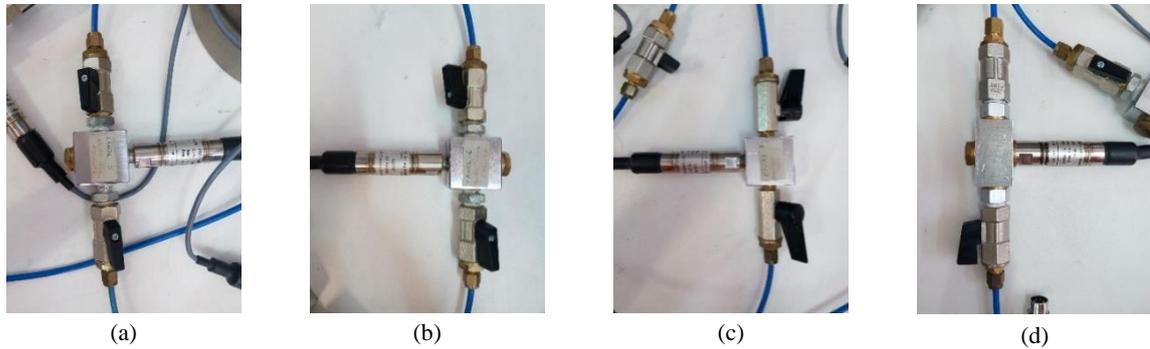


Figura 3.10 - Transdutores de pressão: (a) *inCP*; (b) *outCP*; (c) *back*; (d) *topBack*.

A calibração dos transdutores é feita através de um calibrador da DH Budenberg, que pode ser observado na Figura 3.11 (a). Este calibrador consiste num sistema de indução de pressão que, através de pesos calibrados presentes na Figura 3.11 (b) que são colocados num êmbolo, induz pressão na linha que liga o sistema aos transdutores. O processo de calibração é análogo ao utilizado para a célula de carga, ou seja, faz-se um ciclo de carga e descarga, registando os valores obtidos em volts. Os valores de cada patamar devem ser retirados quando o êmbolo gira a velocidade constante e tal pode-se observar através das linhas presentes no êmbolo.

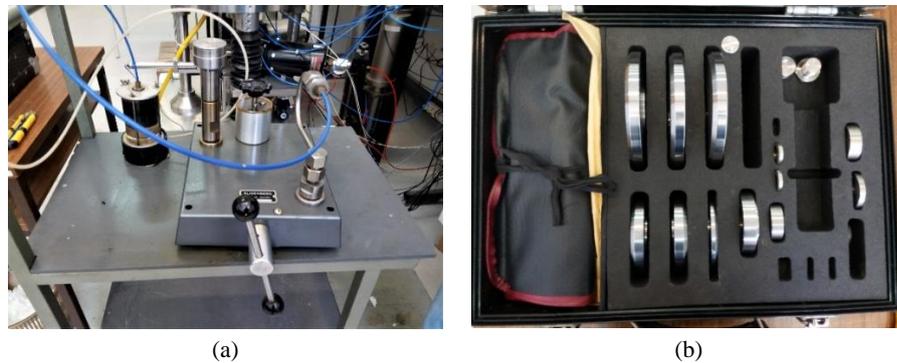


Figura 3.11 - (a) Calibrador DH Budenberg; (b) Pesos calibrados.

No Figura 3.12 pode-se observar a calibração de cada um dos quatro transdutores de pressão.

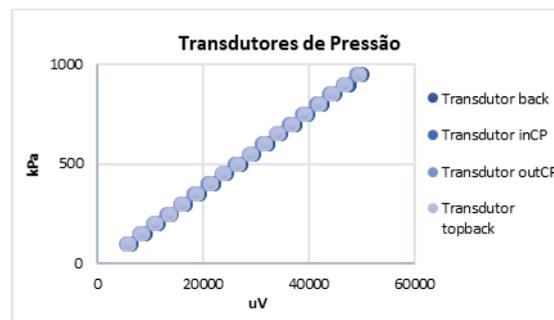


Figura 3.12 - Calibração dos transdutores de pressão.

### 3.2.3. Instrumentação global

#### Transdutores de deslocamento, *trDT* e *axDT* e medidores volumétricos, *inCV* e *sVG*

O deslocamento axial é medido através de um defletómetro de 50 mm, *axDT*, com uma precisão de  $\pm 0.007$  mm, que se encontra representado na Figura 3.13 (a). O deslocamento angular é medido através de um defletómetro de 100 mm, *trDT*, com uma precisão de  $\pm 0.006$  mm, que se encontra representado na Figura 3.13 (b). O *trDT* não calcula diretamente o deslocamento angular, sendo este medido através da variação do cateto oposto do ângulo ao centro de rotação do veio. Esta medição recorre a uma cantoneira de aço inoxidável que se move solidária com o veio central e faz a coligação entre o *trDT* e o veio central. O *axDT* move-se solidário com a plataforma móvel de transferência medindo a distância entre esta e a base do HCA.

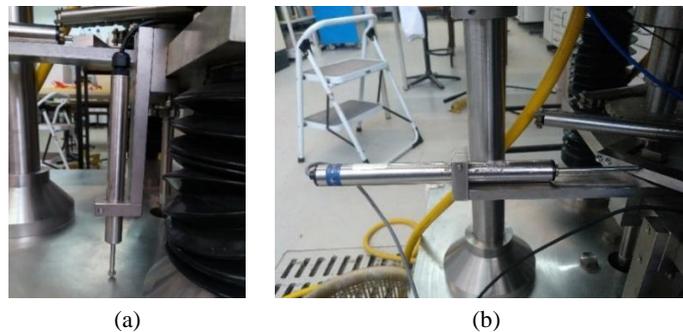


Figura 3.13 - Transdutor de: (a) deslocamento axial; (b) deslocamento angular.

Para calibrar o transdutor de deslocamento axial é necessário recorrer a um micrómetro. Com este instrumento é possível impor pequenos deslocamentos conhecidos ao instrumento a calibrar. Neste caso o transdutor é colocado num suporte de calibração onde também está aplicado o micrómetro. O processo de calibração baseia-se em dois ciclos de deformação, um positivo e outro negativo, com o respetivo registo das voltagens medidas em cada patamar de deformação. Posteriormente traça-se a reta de regressão linear, tal como se faz para os restantes instrumentos calibrados. O transdutor de deslocamento angular é calibrado de forma análoga ao transdutor de deslocamento axial, diferindo apenas a forma como este é fixado ao suporte de calibração. Na Figura 3.14 podem-se observar ambos os processos de calibração.



Figura 3.14 - Calibração do transdutor de: (a) deslocamento axial; (b) deslocamento angular.

O HCA tem dois medidores volumétricos com uma capacidade de  $100 \text{ cm}^3$  e uma precisão média de  $\pm 0.12 \text{ cm}^3$  (Araújo Santos, 2015), representados na Figura 3.15. Ambos os medidores volumétricos foram adquiridos ao *Imperial College London* e permitem medir a água que entra e sai da amostra (*sVG*) e a variação de volume interna (*inCV*). O processo de calibração do medidor volumétrico é muito simples: enche-se o medidor volumétrico e retira-se o primeiro valor da voltagem. De seguida retira-se a água do seu interior de forma faseada para um gobelé de vidro cuja massa foi previamente pesada, conforme se pode observar na Figura 3.15. Com recurso a uma balança de precisão, mede-se a massa de água que é retirada do medidor volumétrico e registam-se as voltagens observadas a cada esvaziamento. Para finalizar aplica-se a regressão linear.

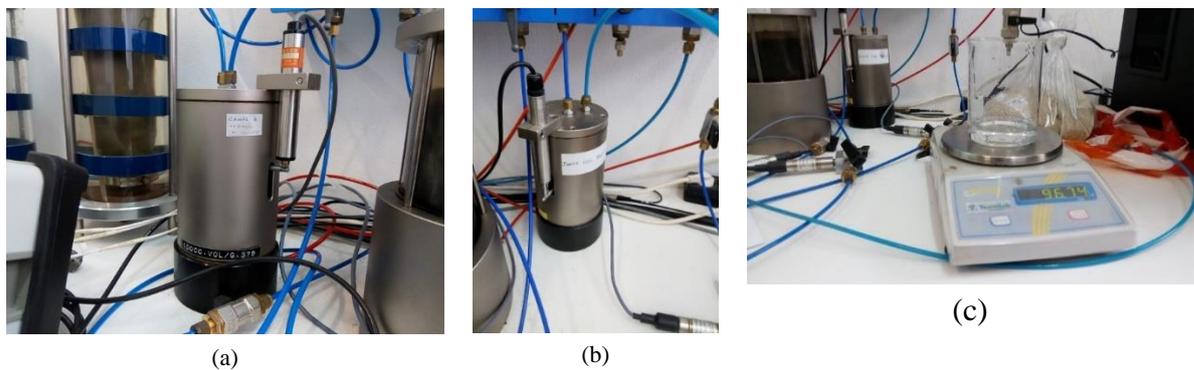


Figura 3.15 - Medidor volumétrico: (a) *sVG*; (b) *inCV*; (c) calibração dos medidores volumétricos.

No Figura 3.16 podem-se observar as retas de calibração de toda a instrumentação global.

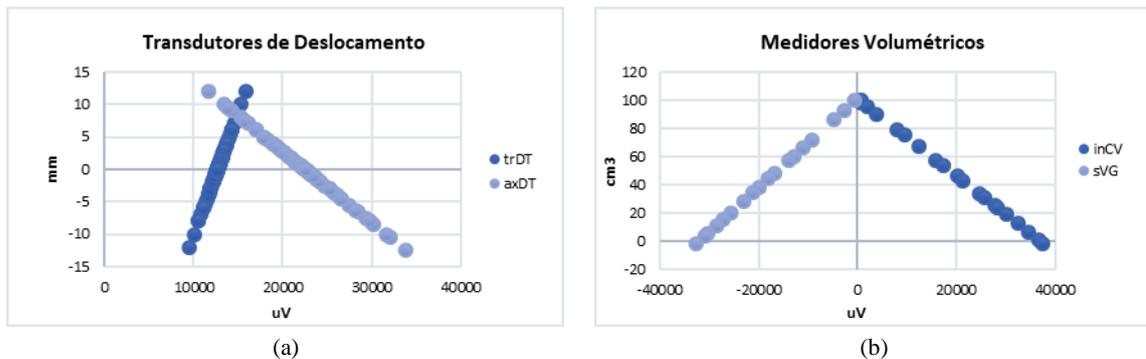


Figura 3.16 - Retas de calibração da instrumentação global: (a) transdutores de deslocamento; (b) medidores volumétricos

### 3.2.4. Instrumentação local

Para se poder analisar o comportamento da areia a pequenas deformações, tal como já foi afirmado anteriormente, é necessário recorrer a instrumentação de leitura local. Assim, no HCA são utilizados quatro tipos de instrumentação local: dois eletrólitos biaxiais, um eletrólito uniaxial, um transformador de diferencial variável linear e três sensores de proximidade. Na Figura 3.17 é possível observar a localização de toda a instrumentação na amostra.

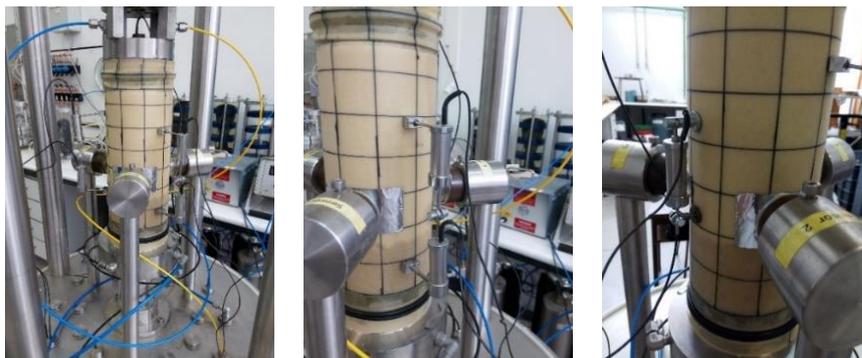


Figura 3.17 - Instrumentação aplicada na amostra.

### **Transdutores de inclinação eletrólitos biaxiais, *axEL1/ trEL1* e *axEL2/trEL2* e uniaxial, *trEL3***

Os transdutores de inclinação biaxiais (denominados por Minh (2006) de eletróníveis biaxiais, terminologia adotada também por Araújo Santos (2015) e também utilizada na presente dissertação), a par com o transdutor de inclinação uniaxial foram desenvolvidos por Burland e Symes (1982) e modificados por Shibuya (1985). Estes instrumentos, representados na Figura 3.18, permitem medir as deformações axiais e angulares da amostra através da medição de uma resistência elétrica com recurso a elétrodos que se encontram dentro de uma cápsula de vidro parcialmente preenchida por um eletrólito de iodo.

Os eletróníveis biaxiais contêm no seu interior cinco elétrodos, formando dois conjuntos ortogonais de três elétrodos colineares. Estes instrumentos, apesar de permitirem a medição de deformações angulares e axiais, não permitem medir os dois simultaneamente. O eletrólito uniaxial apenas mede deformações angulares e contém no seu interior um conjunto de três elétrodos colineares. As deformações são medidas através da inclinação dos eletrólitos que provoca um diferencial de resistência elétrica entre o elétrodo central e os de extremidade. As suas precisões na medição das deformações axiais e angulares são, respetivamente,  $\pm 0.02$  mm e  $\pm 0.007^\circ$  (Araújo Santos, 2015).

No que concerne às deformações axiais, a calibração dos eletrólitos biaxiais é feita separadamente da calibração às deformações angulares. A primeira é realizada recorrendo a um elemento de calibração representado na Figura 3.18 (c). Primeiro fixam-se os dois eletrólitos biaxiais no suporte fixo na parte superior, onde também se encontra o micrómetro aplicado. Depois fixam-se os eletrólitos biaxiais na parte móvel do suporte cuja deformação é imposta pelo micrómetro, conforme se pode observar na Figura 3.18 (d). Em relação à calibração dos eletrólitos biaxiais e do uniaxial à deformação angular, esta é feita recorrendo a um teodolito universal de alta precisão. Os eletrólitos são fixados num suporte angular que posteriormente é aplicado no teodolito. Depois a deformação é aplicada rodando o teodolito em ambos os

sentidos. A calibração é feita da mesma forma que foi feita para o transdutor de deslocamento axial, aplicando-se também uma regressão linear dos valores da voltagem obtidos.

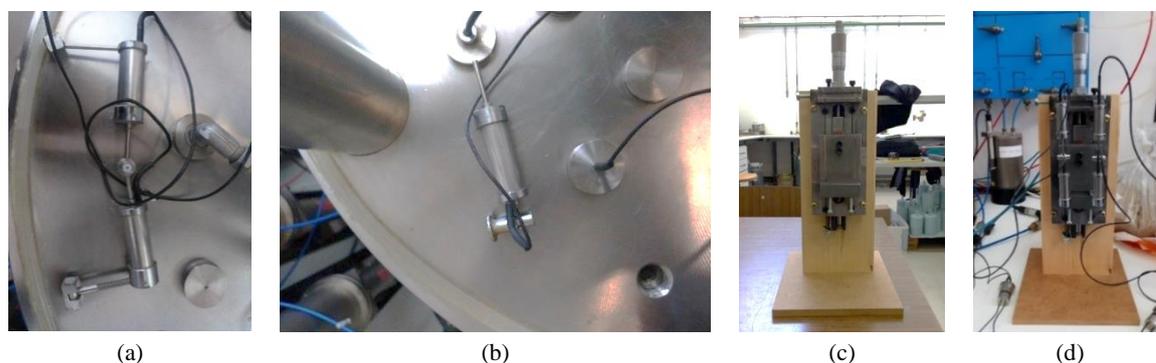


Figura 3.18 - (a) Eletro nível biaxial; (b) eletro nível uniaxial; (c) suporte de calibração; (d) calibração à deformação axial.

### ***Linear Variable Differential Transformer (LVDT), inLVDT e sensores de proximidade, prox1, prox2 e prox3***

O *Linear Variable Differential Transformer*, ou LVDT, é do tipo RDP D5 e permite medir a variação radial do diâmetro interno da amostra. Este instrumento, representado na Figura 3.6 (c), tem uma precisão de  $\pm 0.025\text{mm}$  e mede, no limite, variações até 12.5 mm.

A variação radial do diâmetro externo é determinada através de três sensores de proximidade, modelo KDM-8200-6UI, fornecidos pela Kaman Precision Products (Araújo Santos, 2015). Estes instrumentos funcionam através da medição da variação da impedância entre o instrumento e um alvo metálico, usualmente de cobre ou alumínio. Symes (1983) e Menkiti (1994) observaram que a folha de alumínio de uso doméstico compõe um ótimo alvo para este equipamento devido à sua maleabilidade, condutibilidade elétrica, homogeneidade do material e facilidade de acesso. Assim, para a presente dissertação utilizaram-se alvos compostos por folha de alumínio de uso doméstico.

Todo o processo de calibração para estes quatro instrumentos é análogo ao utilizado nos transdutores de deslocamento axial e angular. A única diferença centra-se no facto de se ter que desenvolver um elemento que permita a receção do sinal pelos sensores de proximidade. Assim, corta-se um elemento circular e envolve-se o mesmo em prata, evitando criar rugosidades nela. Com um pouco de cola de contacto cola-se o refletor de sinal no micrómetro. Na Figura 3.19 pode-se observar a calibração dos mesmos.

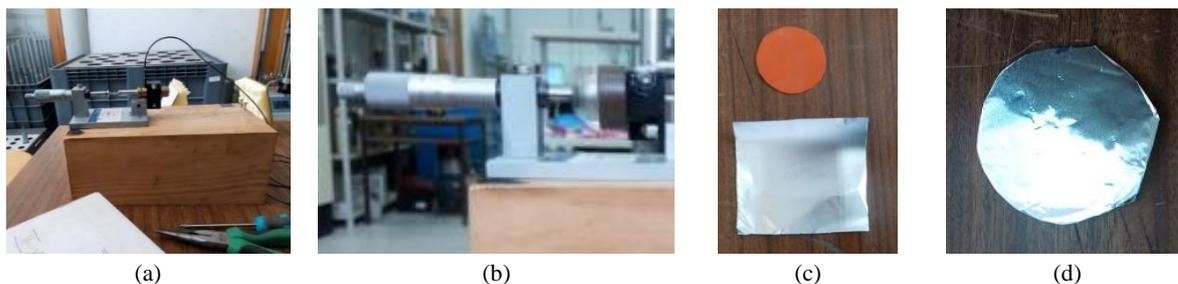


Figura 3.19 - (a) Calibração do LVDT; (b) calibração do sensor de proximidade; (c) elementos constituintes do refletor de sinal; (d) refletor de sinal.

Na Figura 3.20 podem-se observar as retas de calibração de toda a instrumentação local.

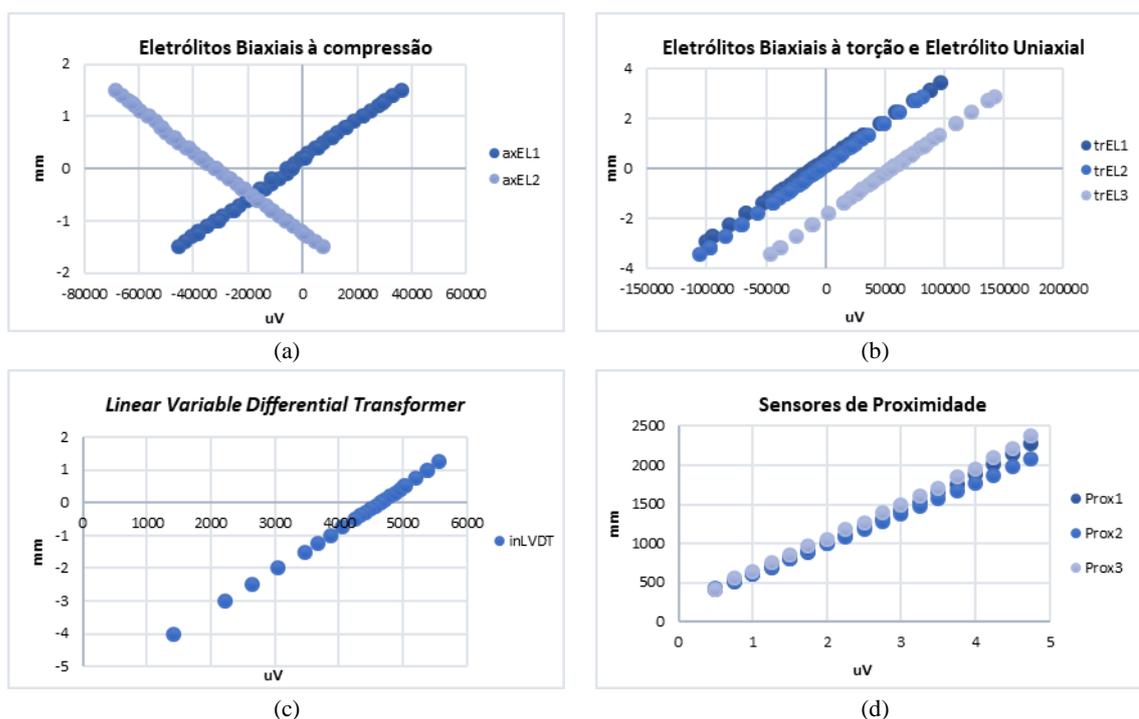


Figura 3.20 - Retas de calibração da instrumentação local: (a) eletrólitos biaxiais à compressão; (b) eletrólitos biaxiais à torção e eletrólito uniaxial; (c) LVDT; (d) sensores de proximidade.

### 3.3. Preparação de Amostras

A preparação de amostras no HCA é feita segundo um processo muito minucioso, pelo que é importante avançar com precaução para não arruinar todo o trabalho feito até ao momento. O processo de montagem do provete é realizado segundo seis fases distintas, cuja descrição é feita de seguida. Note-se que este processo foi desenvolvido para a **amostra pequena**, dado que a amostra grande está fora do contexto da presente dissertação.

### **Fase 1: Preparação do HCA**

- 1.1 Aparafusar o pedestal correspondente (este passo é opcional já que por norma o pedestal já se encontra instalado, devendo apenas ocorrer no caso de troca do tamanho da amostra ou em caso de manutenção).
- 1.2 Apertar as ligações do sistema de sucção, pressão interna, pressão externa e contrapressão (tal como o pedestal, estas ligações não devem ser apertadas e/ou desapertadas sem cuidado, já que as ligações são tipo bicone com dimensões reduzidas, não sendo facilmente encontradas no mercado, podendo assim comprometer todo o trabalho).
- 1.3 Verificar se todos os tubos estão devidamente apertados de forma que se possam abrir as torneiras do ar e da água do sistema de abastecimento e a torneira do ar no quadro.
- 1.4 Colocar e ajustar a pressão no atuador P4. Segundo Araújo Santos (2015), em ensaios monotónicos de compressão, aconselha-se a não utilização deste atuador já que este limita o curso máximo do HCA, limitando assim a deformação axial máxima que se pode induzir à amostra devido ao espaço que o atuador ocupa.
- 1.5 Colocar e ajustar a pressão no atuador P2 e a posição inicial do atuador P3 para esticar a corrente.

### **Fase 2: Instalação das membranas e dos moldes**

- 2.1 Retirar uma membrana interna e medir a sua espessura em pelo menos três pontos em cada extremidade. Deve-se desenhar uma linha a 2 cm e outra a 3.3 cm da base (Figura 3.21 (a)). A escolha da extremidade deve ter em conta a espessura da membrana, devendo colocar-se a extremidade mais fina para cima, para facilitar a fase de preparação da amostra. No entanto, caso a membrana tenha uma espessura na base superior a 0.40 mm, aconselha-se a troca de membrana pois estas espessuras impedem a colocação do disco de base.
- 2.2 Colocar o *o-ring* interno da base no pedestal (Figura 3.21 (a) e (b)). De forma a melhorar as condições de selagem de ar entre a câmara interna e a amostra, aplica-se ao *o-ring* uma fina camada de vaselina sendo, no entanto, opcional, podendo-se montar a amostra sem colocar a vaselina desde que o *o-ring* esteja em boas condições (caso se coloque vaselina, deve-se ter o cuidado de evitar a contaminação da pedra porosa com vaselina, pois esta penetra nos vazios da pedra porosa, colmatando-a).
- 2.3 Alinhar a membrana interna e o disco de base com o auxílio da linha desenhada a 2 cm da extremidade da membrana. Ao colocar a membrana interna e o disco de base no centro do pedestal deve-se utilizar o suporte de apoio para o efeito, tendo a linha desenhada a 3.3 cm da extremidade da membrana como referência. Deve-se ter o cuidado de alinhar os furos do disco de base com os furos do pedestal o mais possível para se poder aparafusar sem torcer a membrana (aconselha-se o técnico a dobrar a membrana interna para facilitar o alinhamento das peças em questão).

- 2.4 Apertar o disco de base com uma chave sextavada, retirar o suporte de apoio e desdobrar a membrana.
- 2.5 Com o molde interno já devidamente montado (Figura 3.21 (c)), nem muito desapertado para facilitar a sua colocação dentro da membrana interna, nem muito apertado para evitar a perturbação da amostra ao desapertar a peça de topo do molde interno aquando da sua retirada. Este deve ser polvilhado com pó de talco de forma abundante e uniforme para facilitar a sua introdução dentro da membrana interna.
- 2.6 Ainda com o suporte de apoio, colocar o molde interno com o bordo redondo virado para cima dentro da membrana interna até este encaixar no pedestal, tendo sempre o cuidado de não trilhar a membrana interna, correndo o risco de a furar.
- 2.7 Retirar o suporte de apoio do molde interno e esticar a membrana interna sem levantar o molde interno (Figura 3.21 (d)). Cortar a membrana de forma a que esta tenha uma altura livre de 6 cm a partir do topo do molde interno. Não se deve ter uma altura livre inferior pois impossibilita a dobragem da membrana interna sobre a placa de topo, impedindo o esticamento desta. Também não é prático ter uma altura livre muito maior pois dificulta a acomodação da membrana interna no molde interno aquando da preparação da amostra.
- 2.8 Caso a pedra porosa não esteja já instalada, é neste momento que se deve instalá-la.
- 2.9 Retirar uma membrana externa, medir a sua espessura em pelo menos três pontos em cada extremidade e desenhar uma grelha quadrada na membrana, caso o ensaio em questão seja de torção (a grelha é opcional, contudo aconselha-se a sua representação pois facilita muito a visualização da deformação provocada na amostra, bem como a visualização dos planos de corte).
- 2.10 Colocar uma camada fina de vaselina à volta da reentrância existente no pedestal onde se colocam os *o-rings* da base da membrana externa (a colocação da vaselina deve ser feita com cuidado para não contaminar a pedra porosa).
- 2.11 Colocar a membrana externa em torno do pedestal e colocar os 2 *o-rings* da base sobre a membrana, utilizando o esticador de *o-rings* (Figura 3.21 (e)).
- 2.12 Instalar o molde exterior tripartido (Figura 3.21 (f)) e apertar o tubo de sucção à ligação existente no molde. Aconselha-se a colocação de vaselina nas juntas do molde de forma a se conseguir esticar a membrana externa através da sucção.
- 2.13 Cortar um papel de filtro com a medida do molde exterior, medir a sua espessura e colocá-lo entre a membrana externa e o molde exterior. O papel de filtro serve para distribuir uniformemente a sucção aplicada por toda a membrana externa.
- 2.14 Dobrar a membrana exterior sobre o molde exterior e esticar a membrana através da aplicação de sucção (Figura 3.21 (h)). A sucção é obtida através da bomba de vácuo existente no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Coimbra.

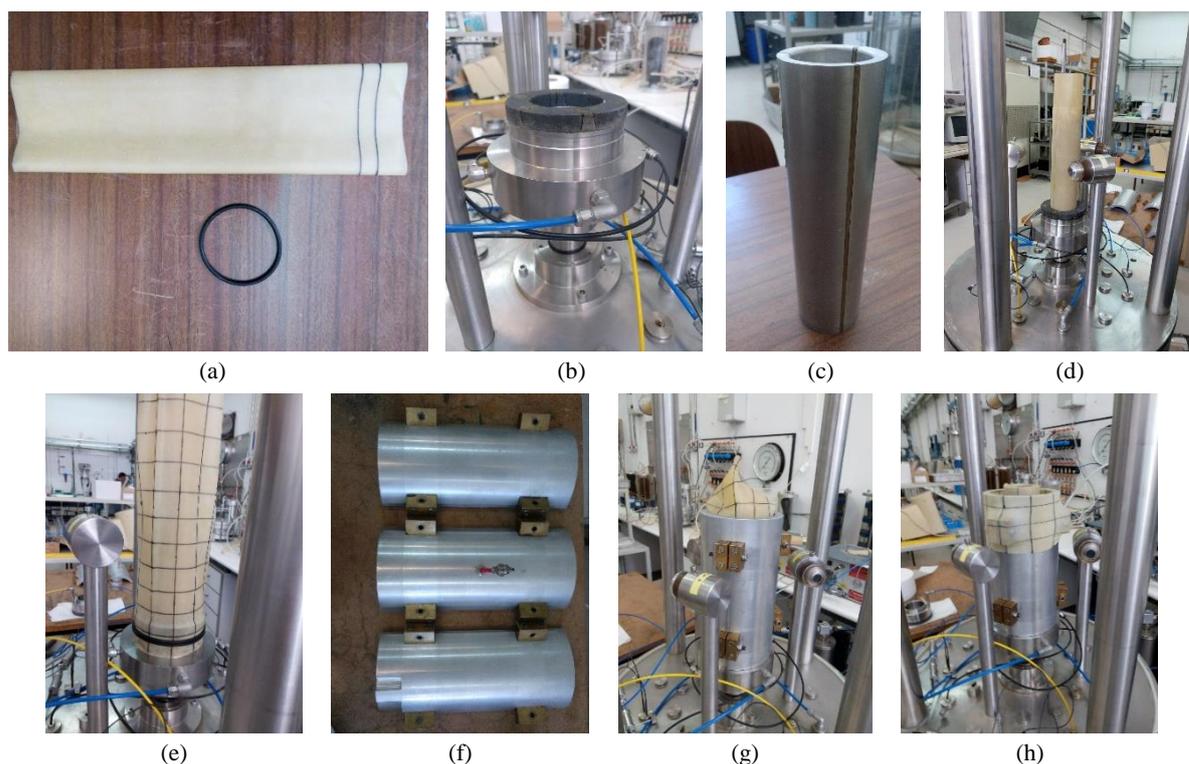


Figura 3.21 – Fase 2: (a) Membrana interna e *o-ring* interno da base; (b) pedestal; (c) molde interno; (d) aplicação da membrana interna e do molde interno; (e) aplicação da membrana externa; (f) molde externo; (g) aplicação do molde externo; (h) membrana externa dobrada sobre o molde externo.

### Fase 3: Preparação da amostra

#### Tipo de solo: areia

#### Método de deposição da amostra: pluviação seca

- 3.1 Dobrar a membrana interna para dentro do molde interno (Figura 3.22 (a)) e prendê-la com um círculo de cartão de forma a não perturbar a queda de areia.
- 3.2 Colocar o resguardo de cartão com cuidado para não furar a membrana externa (o seu peso deve ser medido antes e depois desta fase, pois pode ficar areia nele, impedindo assim uma correta determinação da densidade relativa da amostra).
- 3.3 Colocar a placa de pluviação (Figura 3.22 (b)) conforme a densidade relativa que se pretende (este passo requer um prévio estudo sobre quais as densidades relativas pretendidas e qual o diâmetro, espaçamento e localização dos furos da placa de pluviação que permitem atingir essas mesmas densidades relativas).
- 3.4 Colocação de uma tampa com a abertura virada para baixo de forma a direcionar a areia para os furos da placa de pluviação, de um vaso sem fundo para se depositar a areia utilizada para a preparação da amostra e o funil que impede a areia de sair do vaso sem fundo antes da pluviação (Figura 3.22 (c)) que, tal como o resguardo de cartão, o funil deve ser pesado antes e depois desta fase.

- 3.5 Colocar a areia dentro do vaso sem fundo (para a amostra pequena aconselha-se a colocação de cerca de 3 kg de areia para impedir que a pluviação seja interrompida por deficit de areia, tornando assim a amostra mais uniforme).
- 3.6 Com a ajuda de um alicate, levantar o funil segurando no vaso sem fundo para este não se virar (aconselha-se o técnico a pedir ajuda neste passo, principalmente se a amostra for solta, para permitir que se possa começar o sistema de pluviação assim que se tira o funil). Deve-se ter o cuidado de manter a altura de queda constante e a subida da amostra o mais uniforme possível.
- 3.7 Rasar a amostra, tirar o resguardo de cartão com movimentos pequenos e vagarosos e limpar as membranas, perturbando a amostra o mínimo possível e recolhendo o máximo de areia possível (Figura 3.22 (d) a (g)). É importante o técnico treinar o método de pluviação fora do HCA para poder estimar a areia que não se consegue recuperar para depois calcular da forma mais rigorosa possível a densidade relativa obtida.
- 3.8 Pesar a areia recolhida e calcular a densidade relativa da amostra preparada.

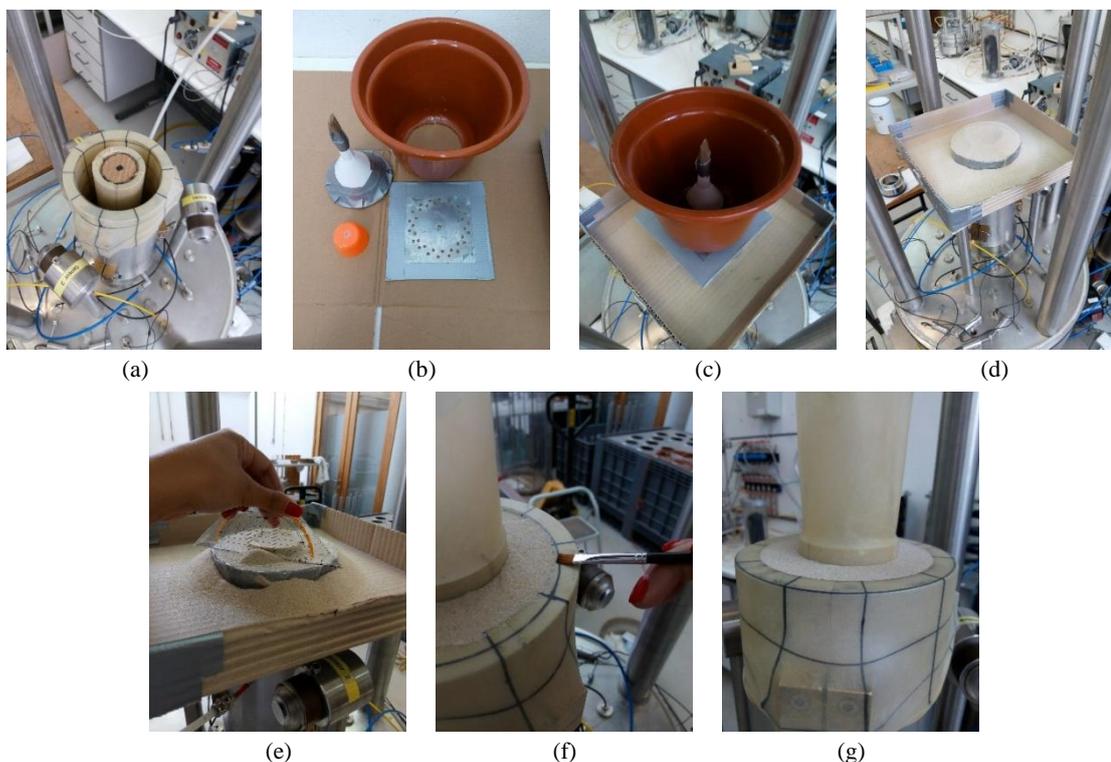


Figura 3.22 – Fase 3: (a) Membrana interna dobrada sobre o molde interno; (b) material utilizado para a pluviação seca; (c) aplicação do material no HCA; (d) amostra logo após a pluviação; (e) amostra rasada com recurso a um aristo; (f) retirada de resíduos com recurso a um pincel; (g) amostra rasada.

#### Fase 4: Ligação do provete à célula de carga

- 4.1 Colocar o esticador de *o-rings* com dois *o-rings* colocados sobre o molde externo (Figura 3.23 (a)).

- 4.2 Aplicar vaselina nas faces exteriores e até meio da face interior da placa de topo (Figura 3.23 (b)). A colocação nas faces exteriores é opcional, já na face interior é crucial para facilitar a aderência entre a membrana interna e a placa de topo, tendo sempre o cuidado de não colocar vaselina na pedra porosa.
- 4.3 Introduzir o *o-ring* da placa de topo na ranhura, previamente untado com vaselina.
- 4.4 Colocar a placa de topo com a pedra porosa (normalmente já está aparafusada à placa de topo) alinhando os furos da sua tampa com os furos do extensor, de forma a reduzir o ajuste rotacional da amostra.
- 4.5 Desdobrar a membrana exterior e passá-la entre o esticador de *o-rings* e a placa de topo. Logo de seguida colocar os *o-rings* na reentrância da placa de topo e dobrar a membrana exterior excedente.
- 4.6 Esticar com cuidado a membrana interna (sem induzir deformações à amostra) e dobrá-la sobre os bordos da placa de topo (e o *o-ring* colocado no ponto 4.3) e colocar o *o-ring* mais fino que serve apenas para segurar a membrana interna enquanto não se coloca a tampa da placa de topo (Figura 3.23 (c)).
- 4.7 Apertar as ligações do topo da amostra através do aperto dos bicones (este passo não é, normalmente, necessário, uma vez que se deve evitar o aperto e desaperto dos bicones para não os danificar, como mencionado no passo 1.2).
- 4.8 Aplicar uma pressão de 175 kPa na câmara de pressão/sucção através da válvula de ar existente no quadro, posicionar a válvula para a sucção, esperar que o silvo de ar estabilize e abrir as torneiras da sucção (*topSuction* e *bottomSuction*). Deve-se ter sempre o cuidado de não colocar o quadro sob sucção. Para que tal não aconteça, não se deve abrir a torneira *A/W Fill* quando uma das outras torneiras, nomeadamente *sVG Fill*, *Inner Cell Fill*, *Outter Cell Fill* e a torneira de admissão de água, esteja aberta.
- 4.9 O nível de água na câmara de pressão/sucção irá baixar. Quando tal ocorrer deve-se:
  - Fechar as torneiras abertas no passo anterior;
  - Posicionar a válvula para a pressão e purgar o ar da câmara através da válvula de purga existente no quadro até a câmara estar cheia de água novamente (ter o cuidado de não deixar toda a água da câmara sair, tendo em conta que, se tal ocorrer, a membrana será sugada e furada, inviabilizando a utilização da câmara de pressão/sucção e consequentemente a utilização do HCA).
- 4.10 Repetir os dois passos anteriores até se verificar a existência ou não de fugas na amostra (deve-se utilizar o transdutor da *back* para controlar os valores de sucção aplicados na amostra). Se verificada a inexistência de fugas, mantém-se a sucção aplicada na amostra mantendo as mesmas torneiras abertas no passo 4.8. Caso contrário, é necessário verificar qual a origem da fuga e se é possível corrigi-la sem se perder a amostra. Caso não seja possível, deve-se proceder ao desmonte da amostra e recomeçar o processo.
- 4.11 Remover o molde interno em quatro fases:

- Desparafusar a peça de topo do molde interno com uma chave sextavada e retirá-la com o suporte de apoio (Figura 3.23 (c));
  - Retirar as três partes do molde de forma cuidada e faseada com a ajuda do suporte de apoio. Deve-se ter o cuidado de não forçar nenhuma das peças a sair. Como tal deve-se retirar primeiro a que estiver mais livre e posteriormente retirar as outras duas, evitando assim furar a membrana interna e inviabilizar todo o trabalho feito até ao momento (Figura 3.23 (d) a (g)).
- 4.12 Com o suporte de apoio próprio para o LVDT, colocá-lo no interior da amostra a meia altura com recurso à cola de contacto de presa rápida, que deve ser colocada no LVDT primeiro e só depois na peça removível do mesmo, pois esta pode cair facilmente e ficar colada onde cair. Deve-se ter cuidado ao colocar o LVDT dentro da amostra pois este pode raspar na amostra e colar de imediato, não sendo aconselhado descolar o LVDT posteriormente, a não ser que não permita a colocação da tampa da placa de topo.
  - 4.13 Passar o cabo elétrico do LVDT no furo existente na tampa da placa de topo e pressionar o tampão contra a placa de topo, colocando também a anilha de pressão. A parte do cabo que vai ficar dentro da amostra deve ser enrolado seguindo o curso natural do fio para não o danificar. O restante cabo passará por um tampo que encaixará na base da câmara externa para se poder ligá-lo à *box*.
  - 4.14 Aparafusar a tampa da placa de topo com a força dos dedos usando uma chave sextavada (Figura 3.23 (h)).
  - 4.15 Aparafusar os potes de resina (Figura 3.23 (i)) nos parafusos existentes na tampa da placa de topo (devem ser untados com vaselina até o fundo dos potes estarem completamente tapados, para impedir que a resina chegue aos parafusos e dificultar o processo de desmonte).
  - 4.16 Encher a câmara interna através do medidor volumétrico *inCV* até sair um esguicho e fechar a câmara interna com o bujão.
  - 4.17 **Necessárias duas pessoas:** aparafusar o varão de extensão à célula de carga e colocar os parafusos que serão mergulhados na resina (Figura 3.23 (j)). Deve-se ter cuidado pois a queda do varão danificaria a amostra e/ou equipamento, podendo ainda provocar lesões no técnico.
  - 4.18 Remover o tubo de sucção da membrana externa e remover o molde externo, arrastando horizontalmente para não danificar a amostra.
  - 4.19 Alinhar os potes de resina com os parafusos colocados no varão de extensão, de forma a que os parafusos estejam o mais centrados possível.
  - 4.20 Posicionar a amostra perto da sua posição de ensaio.
  - 4.21 Preparar 30g de resina de poliéster com 0.90g de catalisador (Figura 3.23 (l)).
  - 4.22 Encher cada pote com 4.50 ml de resina anteriormente preparada com uma seringa comum. O tempo de cura da resina é de cerca de 30 minutos, pelo que durante esse tempo, deve ser colocada toda a instrumentação local na amostra. Após o enchimento

dos potes de resina, deve-se posicionar a amostra na posição final de ensaio (Figura 3.23 (m)).

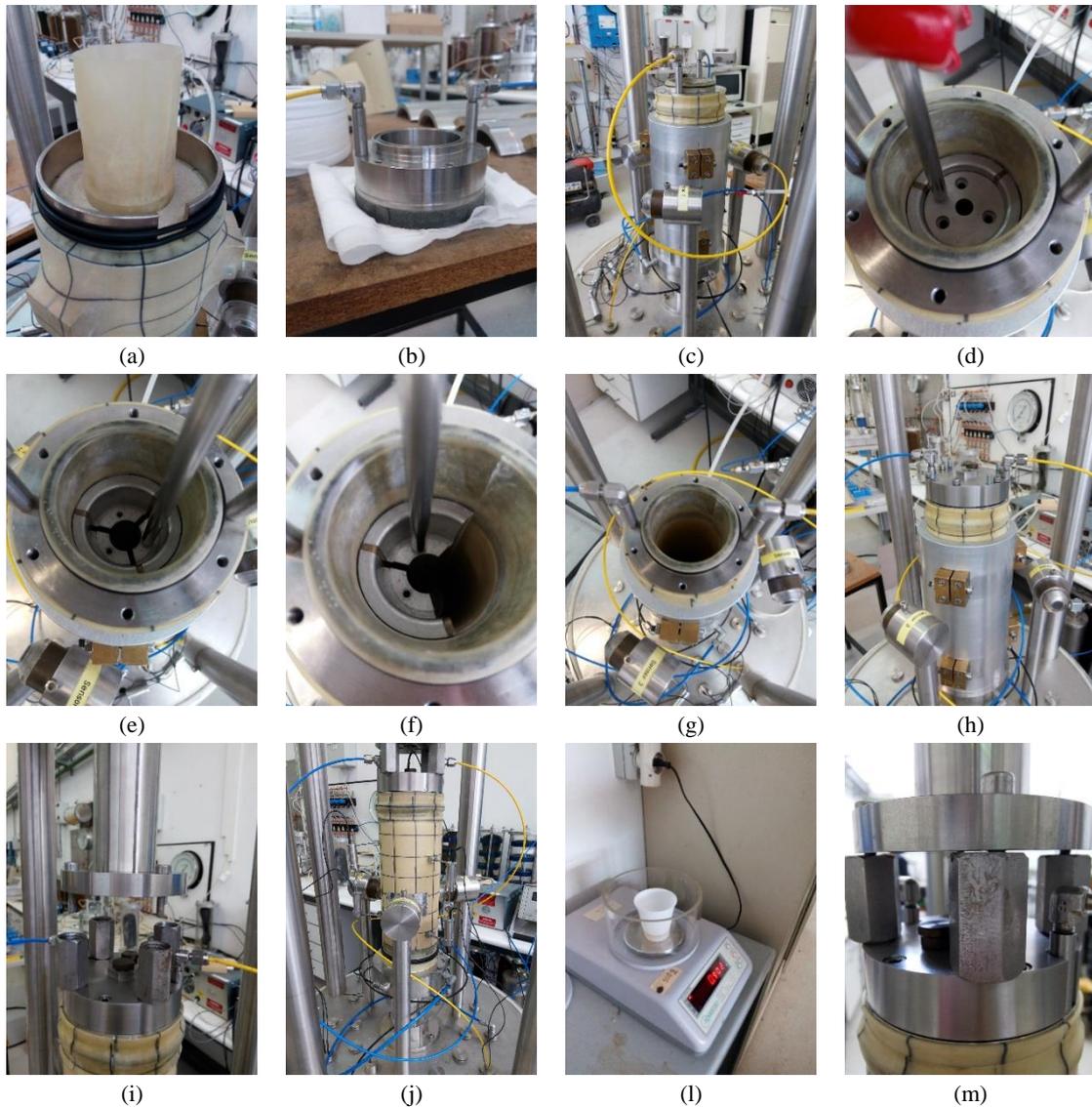


Figura 3.23 – Fase 4: (a) Colocação do esticador de *o-rings* com 2 *o-rings*; (b) placa de topo; (c) membranas externa e interna dobradas sobre a placa de topo; (d) remoção da peça de topo do molde interno; (e) remoção da primeira parte do molde interno; (f) remoção da segunda parte do molde interno; (g) remoção da terceira parte do molde interno; (h) aplicação da tampa da placa de topo; (i) aplicação do varão de extensão e dos potes; (j) amostra após o desmonte do molde externo; (l) preparação da resina; (m) posição de ensaio.

### Fase 5: Instalação da instrumentação local

5.1 Cortar três retângulos com aproximadamente  $9\text{cm}^2$  de alumínio doméstico e aplicar uma fina camada de vaselina no lado baço. No entanto, esta camada não pode ser demasiado fina para evitar que os alvos se descolem da amostra, dado que a vaselina serve como

- cola entre o alumínio e a membrana externa. Ao colocar os alvos na amostra, evitar a formação de rugosidades para não haver erros de leitura.
- 5.2 Colocar os eletrôníveis na amostra. Este processo é feito através de uma cola de presa rápida que permite colocar os instrumentos na membrana. Os eletrôníveis devem ficar centrados na amostra e a sua posição deve ser adaptada ao tipo de ensaio para que tenham um maior curso durante o ensaio.
  - 5.3 Medir todas as distâncias iniciais da instrumentação local (Figura 3.24).

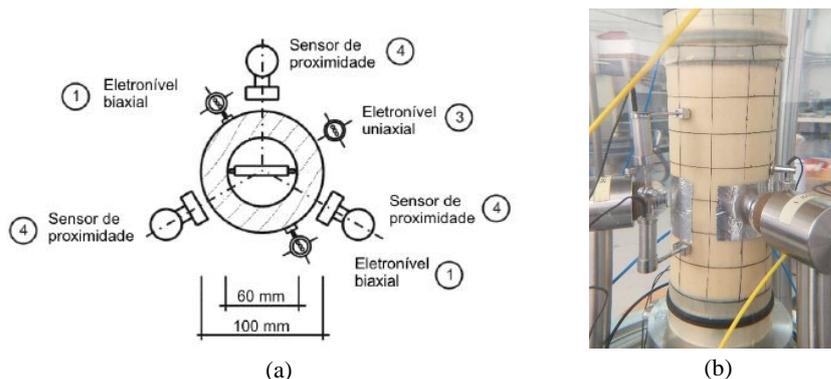


Figura 3.24 – Fase 5: (a) Esquema da instalação da instrumentação local (Adaptado de Minh, 2006; Araújo Santos, 2015); (b) instalação de toda a instrumentação local.

### Fase 6: Colocação da campânula e enchimento da câmara externa

- 6.1 Verificar que todos os fios se encontram no interior dos limites da câmara externa, impedindo que durante a colocação da campânula os fios sejam trilhados.
- 6.2 Com a ponte-grua e a cinta, colocar a campânula no HCA, descendo lentamente e apertando os parafusos devagar (Figura 3.25 (a)).
- 6.3 Encher a câmara exterior com água através de uma mangueira ligada à rede de abastecimento de água sem provocar ondulação. Este passo deve ser feito com a ajuda de uma segunda pessoa para não danificar a célula de carga. Tendo em conta que para o HCA apenas existe a célula de carga instalada, é totalmente desaconselhado fazer este passo sem ajuda (Figura 3.25 (b)).
- 6.4 Ligar o cabo da célula de carga (Figura 3.25 (c)). De salientar que o cabo da célula de carga tem uma posição certa de encaixe, pelo que não se deve forçar a sua entrada.
- 6.5 Fechar a válvula de admissão de água na câmara externa do HCA e na rede de abastecimento de água. Também se deve retirar a mangueira da torneira.
- 6.6 Abrir as torneiras *inCP* e *outCP* (pressões internas e externas) lentamente e diminuir a sucção colocada na amostra, mantendo o diferencial constante, até se atingirem cerca de 32 kPa em ambas as câmaras.

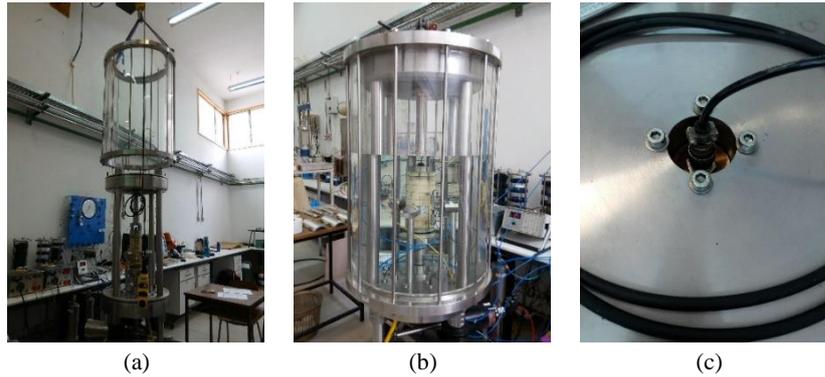


Figura 3.25 – Fase 6: (a) Colocação da campânula; (b) enchimento da câmara do HCA; (c) colocação do cabo da célula de carga.

### 3.4. Saturação

Após a retirada da sucção na amostra, procede-se com a saturação da amostra em duas fases. Começa-se por saturar a baixas pressões naturalmente devido ao diferencial de pressões entre a pressão da água nos poros na base da amostra e a pressão da água nos poros no topo da amostra, que é cerca de 2 kPa, o que leva a água a percolar ascensionalmente. Finda esta fase procede-se a saturação da amostra a altas pressões cujo processo é bastante semelhante ao anterior com a exceção da gama de pressões aplicadas.

#### 3.4.1. Saturação a baixas pressões

Este processo faz-se naturalmente devido ao Este procedimento deve-se repetir até se começar a observar água a pingar dentro da interface pressão/sucção. O procedimento de saturação a baixas pressões da amostra resume-se de seguida.

- 1 Abrir o transdutor da *topBP* de forma a medir os valores da pressão da água nos poros no topo da amostra.
- 2 Abrir as torneiras da *bottomBP* e da *topSuction* tanto nos transdutores como no quadro (antes deve ser verificado se os diferenciais de pressão entre o quadro e a amostra são ou não desprezáveis).
- 3 Colocar um programa de manutenção de pressões constantes a correr. Deve ser verificada a saída de água do medidor volumétrico *sVG* enquanto o programa mantém a pressão intersticial (*back*) constante.
- 4 Quando o *sVG* chegar a cerca de 10 cm<sup>3</sup> fecha-se a sucção, para-se o programa e fecha-se a torneira do transdutor da *Back Pressure* para que este meça a pressão na amostra.
- 5 Abrir a torneira do *VG Fill* (pode estar aberta durante todo o processo) e encher o *sVG*.
- 6 Fechar a torneira do *sVG* e retirar a pressão residual existente no quadro abrindo o esgoto (depois de fechar o esgoto pode-se abrir a torneira do *VG Fill* novamente).
- 7 Verificar se o diferencial de pressões na *Back Pressure* entre o quadro e a amostra é desprezável. Se for abre-se a torneira, caso contrário deve-se diminuir esse diferencial.

- 8 Iniciar o programa, deixar estabilizar o valor da *Back Pressure* e abrir a sucção.

### 3.4.2. Saturação a altas pressões

O processo de saturação a altas pressões faz-se em três fases: subida de pressões, saturação a altas pressões e medição do grau de saturação.

#### Fase 1: Subida de pressões

Deve-se ter cuidado com a membrana da interface da *outCP* pois esta não consegue subir pressões para os valores desejados de uma só vez pelo que tem que se ter atenção para a interface não ficar vazia de mais, danificando a membrana no seu interior.

- 1.1 Abrir as torneiras da *outCP* tanto no quadro como no transdutor, verificando sempre *a priori* o diferencial de pressões.
- 1.2 “Zerar” todos os deslocamentos (exceto o *trDT*), limpar os gráficos e recomeçar o temporizador.
- 1.3 Colocar um programa que permite a subida controlada das tensões a correr (programa 12), mantendo um diferencial das pressões nas câmaras e na amostra constante.
- 1.4 Quando a membrana da interface da *outCP* estiver muito inchada, deve-se parar o programa e anotar a pressão atingida.
- 1.5 Isolar a *outCP* na amostra e abrir a torneira da *Outer Cell Fill* (pode estar aberta desde o início).
- 1.6 Baixar pressões para valores de serviço e encher a interface tendo o cuidado para não encher demasiado, levando a membrana a romper.
- 1.7 Subir pressões até aos valores atingidos anteriormente.
- 1.8 Verificar o diferencial de pressões entre a amostra e o quadro no transdutor da *outCP*. O processo para este transdutor é em tudo igual ao processo feito na *Back Pressure* durante a saturação a baixas pressões. Caso o diferencial seja desprezável, abrir as torneiras.
- 1.9 Iniciar o programa e repetir este processo até se chegar a pressões na *inCP* e *outCP* na ordem dos 660 kPa.
- 1.10 Colocar um programa de manutenção de pressões constantes a correr (programa 14), mantendo os valores atingidos anteriormente.

#### Fase 2: Saturação a altas pressões

Após se atingirem as altas pressões, inicia-se o processo de saturação a altas pressões. Nesta fase o processo é análogo ao processo utilizado na saturação a baixas pressões, com exceção do nível de pressão instalado. Neste caso tem que se aumentar a pressão na interface pressão/sucção para 625 kPa para criar um diferencial de pressão entre a base e o topo da amostra, levando à percolação da água, mitigando assim qualquer ar que ainda haja dentro da

amostra. Aconselha-se a realização deste processo em amostras de areia de Hostun cerca de oito vezes antes de determinar o grau de saturação da amostra.

- 2.1 Parar o programa de manutenção de pressões constantes (programa 14).
- 2.1 Colocar 625 kPa na câmara de pressão/sucção.
- 2.2 Isolar o transdutor da *topBP*, deixando-o apenas a medir os valores aplicados na amostra.
- 2.3 Iniciar o programa de manutenção de pressões constantes (programa 14).
- 2.4 Depois da *Back Pressure* estabilizar, abrir as torneiras da *topSuction* (com as torneiras do quadro da *VG Fill* e da *A/W Fill*, verificar se o diferencial de pressões está correto, tendo o cuidado de **nunca as abrir ao mesmo tempo**).
- 2.5 Quando o *sVG* chegar a cerca de 10 cm<sup>3</sup>, fechar a sucção.
- 2.6 Depois da *Back Pressure* estabilizar parar o programa e isolar a *Back Pressure* na amostra.
- 2.7 Com a ajuda do quadro, baixar pressões no *sVG* para pressões inferiores à pressão na rede de abastecimento de água e enchê-lo.
- 2.8 Subir pressões no *sVG*.
- 2.9 Verificar o diferencial de pressões na *Back Pressure* entre o quadro e a amostra e abrir a *back*. Verificar também o diferencial de pressões entre a *bottomBP* e a *topSuction*.
- 2.10 Correr o programa 14, deixar estabilizar a *Back Pressure* e abrir a *topSuction*.
- 2.11 Repetir este processo oito vezes antes de passar à fase seguinte. Deve-se ter atenção à membrana da câmara pressão/sucção pois ao longo desta fase a câmara vai-se enchendo de água e a membrana vai baixando devido à redução de ar. Quando a membrana estiver muito em baixo, antes de encher o *sVG*, abrir um bocadinho a purga para colocar a membrana na sua posição normal.

### Fase 3: Medição do grau de saturação

Finda a segunda fase, deve-se determinar o grau de saturação da amostra, ou seja, deve-se determinar o parâmetro B. Este processo é muito simples, consistindo na sequência seguinte.

- 3.1 Caso o programa de manutenção de pressões constantes (programa 14) esteja a correr, deve ser parado.
- 3.2 Deixar estabilizar e fechar o transdutor da *Back Pressure* para que se possa medir e registar os valores de pressão intersticial da amostra.
- 3.3 Correr um programa de subida controlada de pressões (programa 16), aumentando a *outCP* até aos 700 kPa. Note-se que a *inCP* também aumenta a par da *outCP* por imposição do programa.
- 3.4 Medir os valores da *inCP*, da *outCP* e da *Back Pressure*.
- 3.5 Correr o programa 16, diminuindo a *outCP* até aos 660 kPa.
- 3.6 Determinar a variação da pressão da água nos poros e a variação de tensão aplicada.

- 3.7 Calcular o  $B$  segundo a seguinte equação, tendo que ser superior a 95%. Note-se que, em todos os ensaios, o valor alcançado de  $B$  nunca foi inferior a 98%.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \quad (3.1)$$

- 3.8 Caso a amostra esteja saturada, fechar as torneiras da sucção e baixar pressões na interface pressão/sucção.

### 3.5. Consolidação da amostra

Após a verificação do grau de saturação da amostra procede-se à consolidação da amostra. Para uma amostra isotrópica utiliza-se o seguinte procedimento:

- 1 Medir deslocamentos.
- 2 “Zerar” todos os leitores de deslocamentos exceto o  $trDT$ .
- 3 Verificar os valores do  $sVG$  e do  $inCV$  e “zerá-los”.
- 4 Colocar o  $trDT$  numa posição muito próxima da definida no início da fase dos ensaios laboratoriais.
- 5 Verificar qual o valor do  $\theta_{ref}$ .
- 6 Calcular as medidas atuais da amostra e colocar os valores medidos no programa, bem como o valor retirado em 5.
- 7 Iniciar um programa de consolidação isotrópica, verificando *a priori* se os alarmes e o programa estão corretamente definidos e correr o programa. Nesta fase baixa-se a pressão de água nos poros até ao valor que se pretende para se obter tensão efetiva requerida. Como se pretende que a consolidação seja isotrópica, a tensão efetiva será igual em todas as direções. Aqui o controlo deixa de ser feito segundo as pressões internas e externas e passa a ser feito com recurso às tensões axial, radial e circunferencial.
- 8 Esperar que o programa passe para o programa de pré corte isotrópico. É nesta fase que ocorre a consolidação propriamente dita. Aqui as pressões mantêm-se inalteradas e o programa é ativo assim que se atingir a tensão de consolidação desejada.
- 9 Manter o programa de pré corte isotrópico a correr o mesmo tempo em todas as amostras para que a fluência sofrida pela amostra seja igual de ensaio para ensaio.
- 10 Após a fase de fluência, colocar o programa de corte a correr (processo dependente do tipo de corte que se pretende fazer, sendo explicado mais adiante nesta dissertação).

### 3.6. Pressupostos teóricos

No HCA preparam-se amostras cilíndricas ocas, como o próprio nome indica. Assim, segundo Nishimura (2005) pressupõe-se que o atrito presente no topo e na base da amostra devido ao contacto com as pedras porosas tem valor nulo e que o material é considerado isotrópico com comportamento linear elástico ou anisotrópico coaxialmente à geometria da amostra. Os pressupostos teóricos anteriores, levam às implicações apresentadas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Implicações no estado de tensão e de deformação [Adaptado de Araújo Santos (2015)].

Estado de tensão	Estado de deformação
Tensão axial uniforme.	Deslocamento axial constante.
Tensão circunferencial independente de $z$ e $\theta$ .	Deslocamento radial independente de $\theta$ .
Tensão tangencial de corte independente de $z$ e $\theta$ .	Deslocamento circunferencial independente de $\theta$ .
Tensões tangenciais de corte nulas radialmente e circunferencialmente.	Deslocamento circunferencial linear vertical e radialmente.
Forças volumétricas reduzidas à força da gravidade.	

### 3.7. Determinação das tensões e deformações

Para determinar as tensões e deformações aplicadas na amostra após a conclusão do ensaio, existe uma variedade de dados que requerem tratamento. Os resultados adquiridos através do programa Triax<sup>®</sup> v5.2.0 são medidos em volts, pois a informação é obtida através de impulsos elétricos. No entanto, através do programa, estes valores já vêm transformados em valores em unidades SI, por intermédio das retas de calibração, tanto para as pressões como para as deformações. O cálculo das tensões e extensões é feito aplicando a solução analítica que mais se adapta, sendo que neste caso se utilizou a mesma que Araújo Santos (2015) que considera que o solo tem um comportamento linear elástico. Tendo em conta que os estados de tensão e de deformação dependem da geometria da amostra, é necessário determiná-la a cada instante do ensaio. Para isso pode-se recorrer às medições obtidas através das instrumentações global e local. Após a determinação da geometria da amostra, o processo é análogo para ambos os resultados. As expressões que determinam a geometria da amostra segundo a instrumentação global são definidas de seguida.

$$\Delta h = -axDT \quad (3.2)$$

$$H = H_0 + \Delta h \quad (3.3)$$

$$\Delta\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{trDT + d_{eixo}}{braço}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{trDT_0 + d_{eixo}}{braço}\right) \quad (3.4)$$

$$\Delta r_i = \sqrt{\frac{\pi \times r_{i_0}^2 \times H_0 + sVG \times 1000}{\pi \times H}} - r_{i_0} \quad (3.5)$$

$$r_i = r_{i_0} + \Delta r_i \quad (3.6)$$

$$r_0 = \sqrt{\frac{\pi \times r_{0_0}^2 \times H_0 + inCV \times 1000 + \Delta V_{amostra}}{\pi \times H}} - r_{0_0} \quad (3.7)$$

$$r_0 = r_{0_0} + \Delta r_0 \quad (3.8)$$

Na expressão 3.4 aparecem duas variáveis novas, sendo elas a  $d_{eixo}$  e o  $braço$ , ambas relacionadas com o  $trDT$ . Como já foi mencionado anteriormente, o  $trDT$  não mede a

deformação distorcional da amostra diretamente, já que ele apenas permite a medição de deformações axiais. Como foi igualmente mencionado, esta medição é feita através de uma cantoneira que se move solidária com o veio central do HCA, permitindo assim a medição do cateto oposto do triângulo feito entre esta, o *trDT* e o veio central, surgindo então estas duas variáveis. O braço é a distância entre o *trDT* e o centro do veio central. A  $d_{eixo}$  é o cateto oposto na posição inicial da amostra, sendo medido desde o centro do veio central, à face da cantoneira onde o *trDT* efetua as medições. A posição inicial do *trDT* deve ser adaptada para cada tipo de ensaio para permitir a medição das deformações angulares em toda a gama do ensaio. Na Figura 3.26 pode-se observar a representação esquemática de ambas as variáveis.

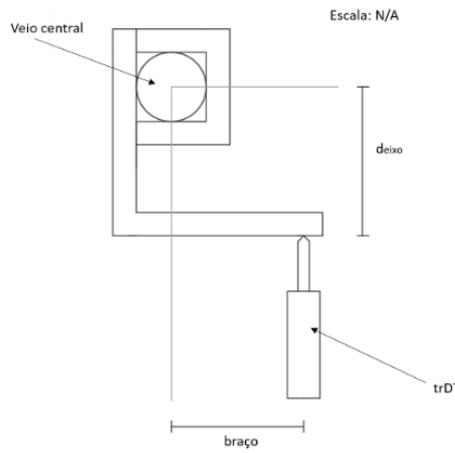


Figura 3.26 - Representação esquemática das variáveis  $d_{eixo}$  e braço.

Segundo a instrumentação local, a geometria é definida da seguinte forma:

$$\Delta h = -\frac{H_0}{2} \times \left( \frac{axEL1}{axEL1_0} + \frac{axEL2}{axEL2_0} \right) \quad (3.9)$$

$$H = H_0 + \Delta h \quad (3.10)$$

$$\Delta \theta = trEL3 \quad (3.11)$$

$$\Delta r_i = \frac{inLVDT}{2} \quad (3.12)$$

$$r_i = r_{i_0} + \Delta r_i \quad (3.13)$$

$$r_0 = -\frac{\sum_{i=1}^3 prox_i - \sum_{i=1}^3 prox_{i_0}}{3} \quad (3.14)$$

$$r_0 = r_{0_0} + \Delta r_0 \quad (3.15)$$

As expressões que definem o estado de tensão são iguais para a instrumentação global e local. Assim tem-se, respetivamente, as expressões para as tensões axial média, radial média, circunferencial média, tangencial de corte média e por fim a variação da pressão da água nos poros:

$$\sigma_z = \frac{W}{\pi \times (r_0^2 - r_i^2)} + \frac{p_0 \times r_0^2 - p_i \times r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \quad (3.16)$$

$$\sigma_r = \frac{p_0 \times r_0 + p_i \times r_i}{r_0 + r_i} \quad (3.17)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_0 \times r_0 - p_i \times r_i}{r_0 - r_i} \quad (3.18)$$

$$\tau_{z\theta} = \frac{3 \times M_t}{2\pi \times (r_0^3 - r_i^3)} \quad (3.19)$$

$$\Delta u = u - u_0 \quad (3.20)$$

Nas expressões anteriores, as variáveis  $W$  e  $M_t$  correspondem ao esforço axial e momento torsor, respetivamente. As variáveis  $r_0$ ,  $r_i$ ,  $p_0$  e  $p_i$  correspondem ao raio externo, raio interno, às pressões externas e pressões internas, respetivamente. As tensões principais são calculadas conforme as seguintes expressões.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{z\theta}^2} \quad (3.21)$$

$$\sigma_2 = \sigma_r \quad (3.22)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{z\theta}^2} \quad (3.23)$$

O estado de deformação, tal como o estado de tensão, calcula-se da mesma forma quer se utilizem as medições globais ou as locais. Assim tem-se, respetivamente, as expressões para as extensões axial média, radial média, circunferencial média, distorção média e, finalmente, a extensão volumétrica:

$$\varepsilon_z = \frac{W}{H_0} \quad (3.24)$$

$$\varepsilon_r = -\frac{u_o - u_i}{r_{0_0} - r_{i_0}} \quad (3.25)$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{u_o + u_i}{r_{0_0} + r_{i_0}} \quad (3.26)$$

$$\gamma_{z\theta} = -\frac{2}{3} \times \frac{\theta}{H_0} \times \frac{r_{0_0}^3 - r_{i_0}^3}{r_{0_0}^2 - r_{i_0}^2} \quad (3.27)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_z + \varepsilon_r + \varepsilon_\theta = \frac{\Delta sVG}{V_0/1000} \times 100\% \quad (3.28)$$

Nas cinco expressões anteriores, as variáveis  $w$ ,  $u_0$  e  $u_i$  referem-se, respetivamente, às deformações axial, radial externa e radial interna. As variáveis  $H$  e  $\theta$  referem-se, respetivamente, à altura da amostra e à deformação angular da amostra. Todas as nomenclaturas utilizadas foram adotadas segundo o critério de Araújo Santos (2015). De notar que a utilização destas expressões assume que os valores iniciais são nulos. As extensões principais são determinadas conforme as expressões que se seguem:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_\theta}{2}\right)^2 + \gamma_{z\theta}^2} \quad (3.29)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_r \quad (3.30)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_\theta}{2}\right)^2 + \gamma_{z\theta}^2} \quad (3.31)$$

### 3.8. Não uniformidades

Como qualquer equipamento laboratorial, o HCA induz diversos tipos de não uniformidades na amostra, que dependem do tipo de ensaio a realizar, pelo que, tendo em conta que a presente dissertação se foca em ensaios de corte, interessa mencionar os que afetam os seus resultados.

A utilização de pedras porosas na base e no topo da amostra impedem-na de se mover livremente, devido à rugosidade das pedras induzir atrito na amostra, originando tensões de corte (Symes, 1983). Apesar de haver a possibilidade de lubrificar os topos, no HCA não é válido devido ao facto do HCA transmitir o momento torsor à amostra através da fricção (Nishimura, 2005). É importante salientar que o atrito nos topos não é a única causa de não uniformidade de tensões na amostra, sendo que a curvatura do cilindro oco e a forma como a torção é aplicada na amostra também têm grande influência. Estas não uniformidades de tensão podem ser quantificadas e podem ser analisadas em Zdravkovic (1996) com mais detalhe.

As amostras são preparadas com recurso a membranas que servem para as revestir durante o ensaio. Ao revestirem a amostra, estão também a reforçá-la, o que pode alterar as tensões na amostra. No entanto, após ensaios realizados em várias membranas usadas, concluiu-se que o reforço que as membranas induzem na amostra pode ser desprezado (Araújo Santos, 2015). Menkiti (1994) afirma que pode ocorrer a penetração da membrana nos vazios da amostra, levando a uma subestimação da pressão da água nos poros em ensaios não drenados e a erros de medição da deformação volumétrica da amostra. Este autor afirma, no entanto, que para ensaios onde não ocorre liquefação, as não uniformidades provocadas pela utilização de membranas nos ensaios no HCA podem ser desprezadas.

## 4. TRABALHO LABORATORIAL DESENVOLVIDO

### 4.1. Preparação da fase de ensaios

Antes da realização dos ensaios, foi necessário proceder à preparação do equipamento e dos seus instrumentos de medição. Deste modo, procedeu-se à calibração dos vários instrumentos de medição (locais e globais). Esta operação permitiu igualmente verificar o estado do equipamento, principalmente dos componentes de desgaste mais rápido tais como torneiras e vedantes. Nesta fase, foi necessário também desenvolver e apurar uma técnica de preparação de amostras que garantisse a qualidade e homogeneidade das amostras.

#### 4.1.1. Preparação do equipamento

Após a calibração de toda a instrumentação do equipamento, procedeu-se à saturação de todas as linhas do equipamento. Para tal, colocou-se a campânula, encheu-se o HCA de água e subiram-se as pressões para valores na gama dos 700 kPa. No entanto, durante a subida de pressões verificou-se uma fuga de água num dos pilares da estrutura de reação, conforme Figura 4.1.

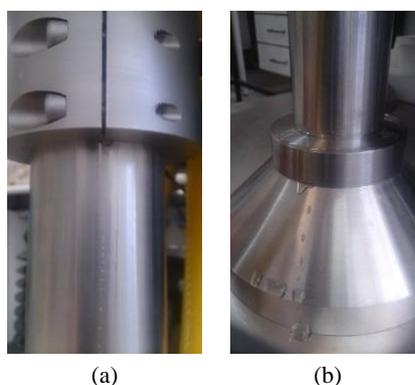


Figura 4.1 - Fuga: (a) Ponto da fuga; (b) Base do pilar.

Em colaboração com o *Imperial College London*, foi possível identificar a origem da fuga, tendo-se delineado um procedimento de intervenção. Na origem da fuga estava um *o-ring* interno que procede à vedação entre o pilar e o anel de reforço inferior do HCA. Para a sua substituição, desmontou-se o pilar e trocou-se o *o-ring* existente que se encontrava degradado. Após a montagem do pilar, retomou-se o procedimento de saturação das linhas do equipamento, tendo ficado a altas pressões durante três semanas, não se tendo verificado mais nenhuma fuga.

#### 4.1.2. Preparação de amostras “teste”

Durante o período em que a fuga se encontrava por resolver e a duração da saturação das linhas do equipamento, realizaram-se ensaios de preparação de amostras fora do HCA. Esta fase é muito importante para que o técnico consiga controlar a densidade relativa da amostra e para que estas sejam o mais uniformes possível. Para tal foram utilizados os moldes interno e externo próprios do HCA e um pedestal desenvolvido por Araújo Santos (2015). A metodologia utilizada descreve-se da seguinte forma:

- 1 Colocar o pedestal sobre um recipiente na balança de precisão.
- 2 Colocar os moldes interno e externo sobre o pedestal e tarar a balança.
- 3 Colocar o resguardo, a placa furada de pluviação, o vaso sem fundo e o funil sobre o molde externo.
- 4 Retirar uma fração de areia de Hostun e apontar a sua massa (deve-se retirar cerca de 3 kg).
- 5 Colocar a areia no vaso sem fundo e depositar a areia por pluviação seca.
- 6 Limpar o excesso de areia existente na amostra sem a perturbar.
- 7 Retirar o resguardo, acabar de limpar e pesar a areia existente na amostra subtraindo a areia perdida existente no recipiente.
- 8 Pesar a massa de areia sobranete e calcular a densidade relativa obtida na amostra, utilizando as seguintes expressões:

$$\gamma_d = m_{\text{areia}} \frac{9.8/1000}{V_{\text{amostra}}} \quad (4.1)$$

$$e = \frac{G_s \times \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \quad (4.2)$$

$$D_r = \frac{e_{\text{máx}} - e}{e_{\text{máx}} - e_{\text{min}}} \times 100 \quad (4.3)$$

Onde  $m_{\text{areia}}$  representa a areia presente na amostra,  $V_{\text{amostra}}$  é o volume da coroa limitada pelos moldes interno e externo, sendo a fórmula do volume de um cilindro oco representada na equação 4.3, onde  $d_e$  e  $d_i$  são, respetivamente, os diâmetros externo e interno. Todos os valores foram aplicados em unidades SI.

$$V_{\text{amostra}} = \frac{\pi \times d_e^2}{4} - \frac{\pi \times d_i^2}{4} \quad (4.3)$$

A calibração do processo de pluviação é um processo iterativo, devendo ser testadas diferentes placas de pluviação. Numa primeira fase, utilizaram-se diversas placas desenvolvidas por Araújo Santos (2015), tendo-se começado pela que permitia obter uma densidade relativa de 40% na areia de Coimbra. Ao realizar os testes, verificou-se que os furos desta placa não

permitted to reach this range of values due to the fact that the Hostun sand is a finer sand than the Coimbra sand, concluding that a plate with larger holes would be more suitable. Thus, experiments were carried out until reaching the one that allowed obtaining relative densities of 40%. In Figure 4.2 (a) and Figure 4.2 (b) are illustrated the plates that allow preparing samples with relative densities of 40% and 65%, respectively. Tests were also carried out with rain plates for dense samples, concluding that the plate that allowed densities of 70% in the Coimbra sand (Araújo Santos, 2015) allowed densities of about 90% in the Hostun sand. The referred plate is found in Figure 4.2 (c).

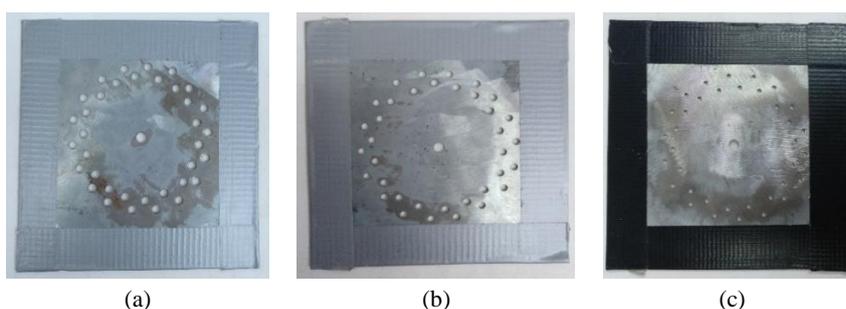


Figura 4.2 - Placas furadas para pluviação: (a) Amostras soltas; (b) Amostras medianamente densas; (c) Amostras densas.

In Quadro 4.1 are found the relative densities obtained for dense, loose and medium density samples.

Quadro 4.1 - Densidade relativa dos ensaios de preparação de amostras realizados fora do HCA.

Ensaio	Amostra Solta							Amostra Densa			Amostra Medianamente Densa				
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	1	2	3	4	5
$m_{\text{areia}}$ (kg)	1.6550	1.6432	1.6481	1.6419	1.6398	1.6430	1.6451	1.7980	1.8109	1.8138	1.7280	1.7293	1.7495	1.7340	1.7425
$V_{\text{amostra}}$ (m <sup>3</sup> )	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	13.9544	13.8549	13.8962	13.8439	13.8262	13.8532	13.8709	15.1601	15.2689	15.2933	14.5699	14.5809	14.7512	14.6205	14.6921
$e$	0.86	0.87	0.86	0.87	0.87	0.87	0.87	0.71	0.70	0.69	0.78	0.78	0.76	0.77	0.76
$D_r$ (%)	42.37%	38.45%	40.09%	38.02%	37.31%	38.39%	39.09%	85.79%	89.37%	90.16%	65.43%	65.83%	71.86%	67.24%	69.78%

## 4.2. Ensaios monotónicos

For the characterization of the behavior of the Hostun sand under monotonic actions, seven tests were carried out with loose samples ( $D_r=40\%$ ) for drained, non-drained and two consolidation stresses: 100 kPa and 200 kPa.

### 4.2.1. Programa experimental

The concretization of the monotonic torsion tests is based on the detailed process between sections 3.3 and 3.5 of the present dissertation. All tests were carried out with control of the deformations, using two angular deformations imposed with different velocities: for

distorções até 1%, impôs-se uma taxa de deformação angular de 0.5%/h para se obterem mais resultados na gama das pequenas deformações; para valores superiores de distorção, aumentou-se a taxa de deformação angular para 1%/h. Em todos os ensaios, a amostra foi consolidada isotropicamente tendo sido aplicada uma tensão total de 660 kPa, variando a pressão de água nos poros de ensaio para ensaio. Realizaram-se ensaios drenados e não drenados para a pressão de água nos poros de 560 kPa e 460 kPa, levando a tensões efetivas de 100 kPa e 200 kPa, respetivamente. Tendo em conta as limitações do HCA, nunca se levou nenhuma amostra à rotura, tendo o fim do ensaio ocorrido por limitação das medições do *trDT*, não sendo esta, no entanto, a única limitação do HCA.

Para os ensaios realizados utilizou-se a descrição D/UMTT Dr\_p’\_nº do ensaio, onde DMTT significa *Drained Monotonic Torsional Test* e UMTT significa *Undrained Monotonic Torsional Test*. Por exemplo, ao realizar-se um ensaio de torção monotónico drenado de uma amostra com densidade relativa de 40% para uma tensão efetiva de 100kPa ter-se-á DMTT 40\_100\_1. No Quadro 4.2 estão representados os ensaios de corte monotónico realizados.

O ensaio DMTT\_40\_100\_2 foi invalidado por limitação do medidor volumétrico, que tinha pouca água no seu interior. No ensaio DMTT\_40\_100\_3 houve duas fugas durante a subida de pressões, pelo que foi necessário realizar uma intervenção cautelosa para não danificar a amostra. Para proceder à intervenção baixaram-se as pressões aplicadas à amostra, aplicou-se sucção na amostra, tirou-se a água da câmara externa e a campânula e resolveu-se a fuga que provinha de dois pontos diferentes, o *o-ring* do anel de reforço inferior estava danificado, pelo que teve de ser trocado. O outro ponto de fuga encontrava-se num dos sensores de proximidade que estava mal apertado no topo, levando a que, com a subida de pressões a água percolasse pelo seu interior. Após a resolução das fugas, procedeu-se ao processo oposto da desmontagem. Após a intervenção, realizaram-se passagens de água a baixas pressões novamente e só depois se tornaram a subir pressões, levando o curso normal de ensaio a partir desse momento.

Quadro 4.2 - Ensaios monotónicos realizados e respetivas condições iniciais.

Designação do ensaio	Dr (%)	e0	p'0 (kPa)	u0 (kPa)	q0 (kPa)	Condições de drenagem	Observações
DMTT 40_100_1	40.72%	0.86	100	560	0	Drenado	
DMTT 40_100_2	37.75%	0.87	100	560	0	Drenado	Inválido
DMTT 40_100_3	35.63%	0.88	100	560	0	Drenado	LVDT avariado e Fuga
DMTT 40_200_1	34.45%	0.88	200	460	0	Drenado	LVDT avariado
UMTT 40_100_1	39.15%	0.87	100	560	0	Não drenado	LVDT avariado
UMTT 40_200_1	42.45%	0.86	200	460	0	Não drenado	LVDT avariado
UMTT 40_200_2	34.43%	0.88	200	460	0	Não drenado	LVDT avariado

#### 4.2.2. Resultados experimentais

Analisando os resultados obtidos dos ensaios monotônicos drenados válidos, pode concluir-se que as amostras apresentam, inicialmente uma fase de amolecimento por deformação, onde a amostra contrai devido ao rearranjo das partículas por imbricamento, conforme mencionado anteriormente. Para níveis de deformação superiores, começa a observar-se que a amostra atinge o estado de transformação de fase, onde ocorre a mudança do estado contrativo para dilatante, onde a amostra passa para um estado de endurecimento por deformação.

Na Figura 4.3 é possível observar-se a extensão volumétrica em função da deformação angular imposta à amostra, onde se verifica que a amostra com tensão efetiva de 200 kPa contraiu mais que as amostras com 100 kPa, tendo o ETF ocorrido para níveis de deformação angular substancialmente superiores, sendo que os dois ensaios realizados sob as mesmas condições são iguais, validando assim o método de preparação de amostras. A Figura 4.4 também demonstra que o método de preparação de amostras é válido, dado que o ensaio DMTT 40\_100\_3 estabiliza para valores iguais ao ensaio DMTT 40\_100\_1. Como nos ensaios drenados realizados a tensão efetiva se manteve constante, não se consegue observar qual a tensão de corte mobilizada neste estado, pelo que a definição do ETF não é direta nos ensaios drenados. Para o definir, tem-se de determinar a dilatância.

Em relação aos ensaios com tensão efetiva de 100 kPa, consegue-se observar que a amostra DMTT\_40\_100\_1 contrai mais que a DMTT\_40\_100\_3. Como se pode observar pela Figura 2.12, os resultados obtidos por Azeiteiro et al. (2017) para ensaios drenados na areia de Hostun indicam esta tendência, ou seja, para a mesma tensão efetiva, quanto maior a densidade relativa maior deformação é necessária para passar do comportamento contrativo para dilatante, ainda que as diferenças entre as densidades relativas de cada ensaio sejam baixas.

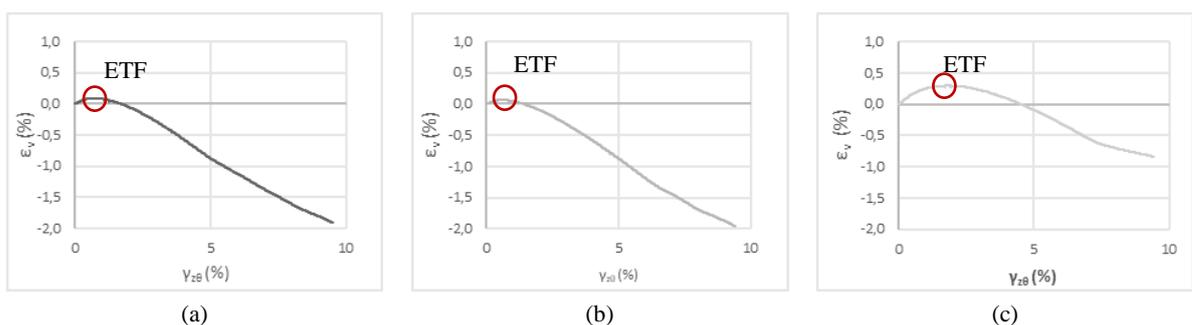


Figura 4.3 - Extensão volumétrica-deformação angular dos ensaios drenados: (a) DMTT\_40\_100\_1; (b) DMTT\_40\_100\_3; (b) DMTT\_40\_200\_1.

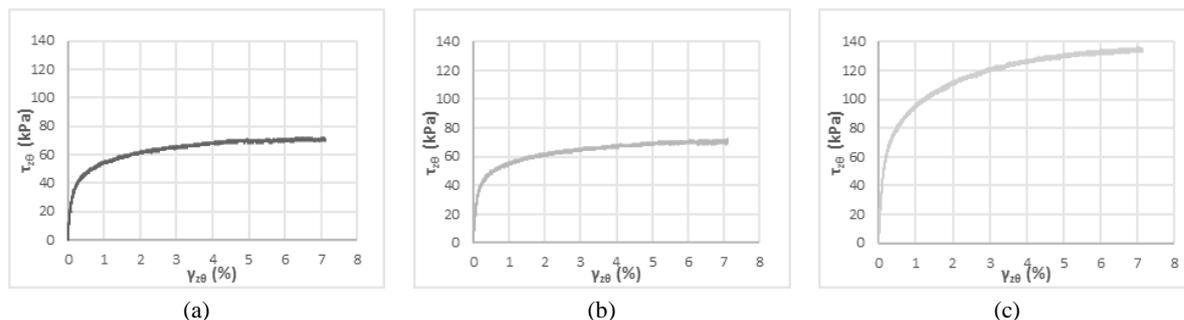


Figura 4.4 - Tensão-deformação dos ensaios drenados: (a) DMTT\_40\_100\_1; (b) DMTT\_40\_100\_3; (c) DMTT\_40\_200\_1.

Observando na Figura 4.5 a morfologia das amostras após cada ensaio, podem observar-se em cada um deles que as superfícies de corte são bem visíveis. Este fenómeno pode ser justificado por haver uma concentração de tensões segundo o plano das superfícies de corte observadas.

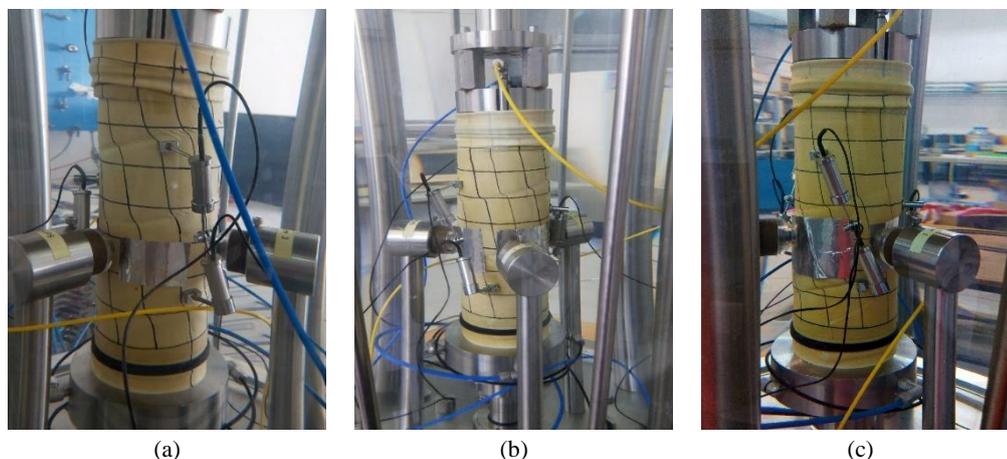


Figura 4.5 - Morfologia da amostra após os ensaios drenados: (a) DMTT 40\_100\_1; (b) DMTT 40\_100\_3; (c) DMTT 40\_200\_1.

Os ensaios de corte sob condições não drenadas, permitem concluir que nos momentos iniciais do ensaio ocorre o amolecimento por deformação, mas para tensões de corte mais elevadas começam a mostrar um comportamento de endurecimento por deformação. Tal pode ser observado através da Figura 4.6, onde se pode observar o momento em que ocorre a passagem do comportamento contrativo para dilatante, conforme a definição de ETF o defende. Na mesma figura consegue-se observar que para tensões efetivas superiores, ocorre uma redução da mesma mais acentuada. Na Figura 4.7 podem observar-se as relações tensão-deformação de cada um dos três ensaios não drenados, onde se pode concluir que para tensões efetivas superiores, se atinge o ETF para níveis de tensão superiores, mesmo havendo uma redução da tensão efetiva maior. Na Figura 4.8 pode observar-se a relação da variação da pressão de água nos poros em função da deformação.

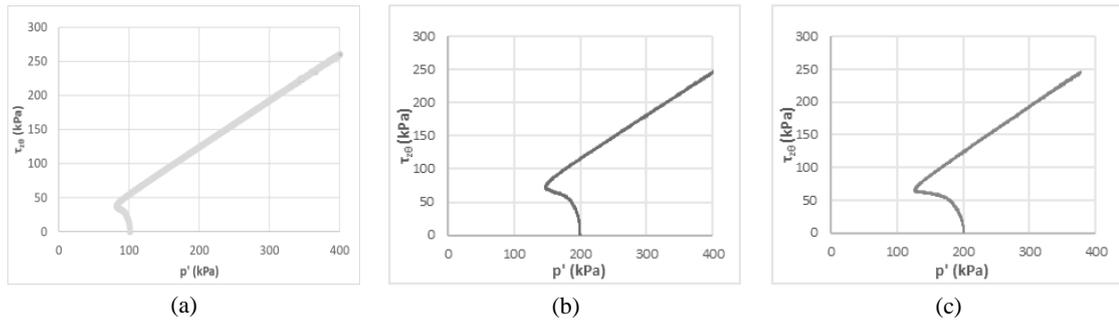


Figura 4.6 – Trajetória de tensões: (a) UMTT 40\_100\_1; (b) UMTT 40\_200\_1; (c) UMTT 40\_200\_2.

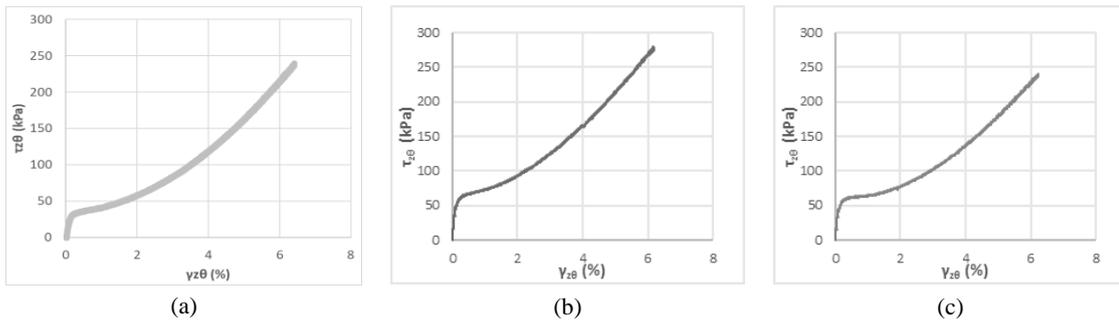


Figura 4.7 - Tensão-deformação dos ensaios não drenados: (a) UMTT 40\_100\_1; (b) UMTT 40\_200\_1; (c) UMTT 40\_200\_2.

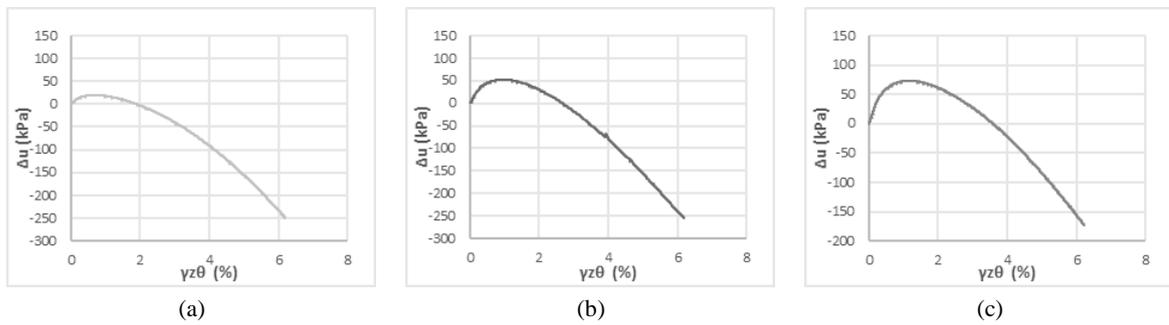


Figura 4.8 - Variação da pressão intersticial-deformação dos ensaios não drenados: (a) UMTT 40\_100\_1; (b) UMTT 40\_200\_1; (c) UMTT 40\_200\_2.

Na Figura 4.9 pode-se observar a morfologia de cada um dos ensaios não drenados. Tal como nos ensaios drenados, conseguem-se observar as superfícies de corte de uma forma clara, sendo mais visível nos ensaios com tensão efetiva de 200 kPa.

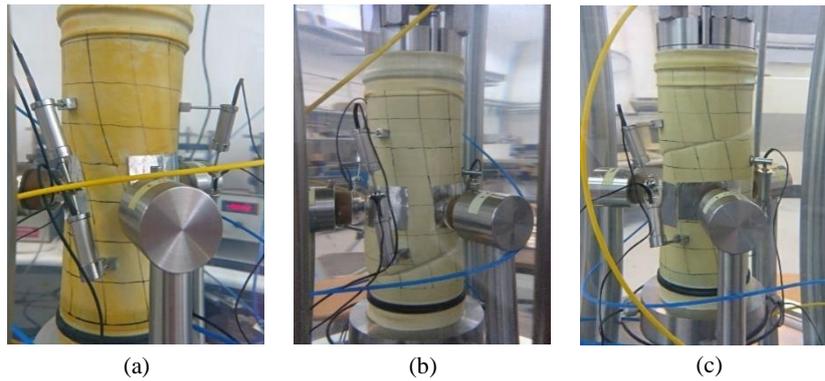


Figura 4.9 - Morfologia da amostra após os ensaios: (a) UMTT 40\_100\_1; (b) UMTT 40\_200\_1; (c) UMTT 40\_200\_2.

### 4.2.3. Resposta da areia de Hostun no domínio das pequenas deformações

A análise da resposta da areia às pequenas deformações baseia-se essencialmente na determinação da rigidez inicial e na respetiva degradação da rigidez.

#### Rigidez Inicial

Analisando os gráficos de tensão-deformação representados na Figura 4.10 e na Figura 4.11 podem observar-se os valores da rigidez inicial para cada ensaio realizado através do valor da inclinação da reta. Note-se que, devido a redução de unidades, a rigidez inicial em MPa se obtém dividindo por 10 o declive da reta de ajuste. De notar que a reta de ajuste de cada ensaio não passa na origem devido à existência de tensões de corte residuais no início de cada ensaio.

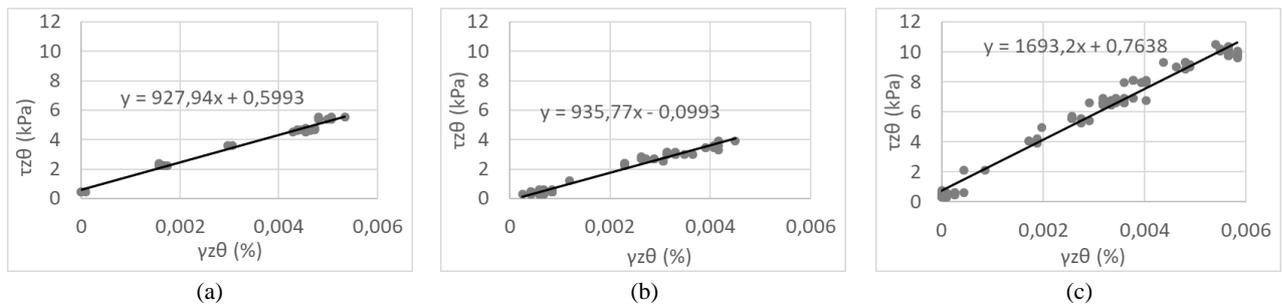


Figura 4.10 - Determinação da rigidez inicial,  $G_0$  dos ensaios não drenados: (a) DMTT\_40\_100\_1; (b) DMTT\_40\_100\_3; (c) DMTT\_40\_200\_1.

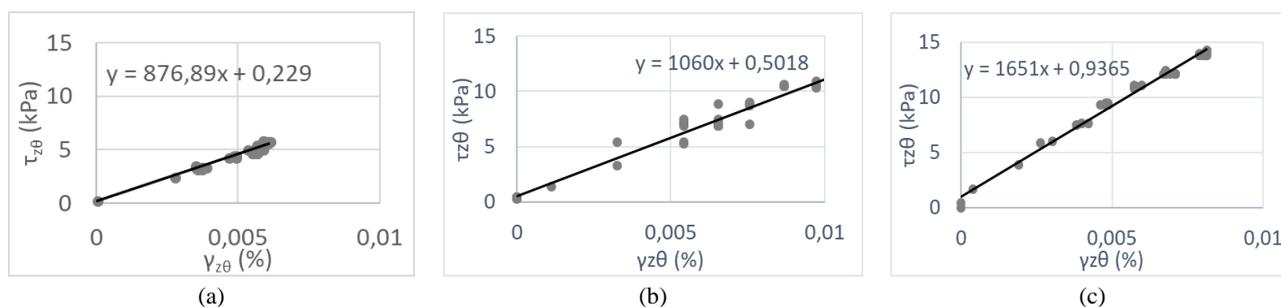


Figura 4.11 - Determinação da rigidez inicial,  $G_0$  dos ensaios não drenados: (a) UMTT\_40\_100\_1; (b) UMTT\_40\_200\_1; (c) UMTT\_40\_200\_2.

Comparando os valores normalizados obtidos com os publicados por Azeiteiro et al. (2017) e apresentados anteriormente na Figura 2.10, verifica-se que os valores da rigidez inicial normalizada se encontram acima dos obtidos pelos referidos autores, especialmente nos ensaios DMTT 40\_200\_1 e UMTT 40\_200\_2. Nestes ensaios, a rigidez inicial obtida é sensivelmente cerca de 80% superior aos obtidos por Azeiteiro et al. (2017). Conclui-se então que para os ensaios realizados para uma tensão efetiva de 200 kPa o valor de rigidez inicial que é validado é cerca de 168 MPa. A diferença observada destes ensaios para o ensaio UMTT 40\_200\_1 pode dever-se a alguma alteração geométrica que a amostra tenha sofrido durante o ensaio, no entanto seriam necessários mais ensaios para verificar a validade deste valor. Os valores obtidos em cada ensaio encontram-se resumidos no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Rigidez inicial obtida nos ensaios realizados.

Designação do ensaio	$D_r$ (%)	$p'$ (kPa)	$G_{max}$ (MPa)
DMTT 40_100_1	40.72%	100	92.79
DMTT 40_100_3	35.63%	100	93.58
DMTT 40_200_1	34.45%	200	169.32
UMTT 40_100_1	39.15%	100	87.69
UMTT 40_200_1	42.45%	200	106.00
UMTT 40_200_2	34.43%	200	165.00

Na Figura 4.12 podem-se observar os resultados obtidos sob a forma normalizada juntamente com os valores de Azeiteiro et al. (2017).

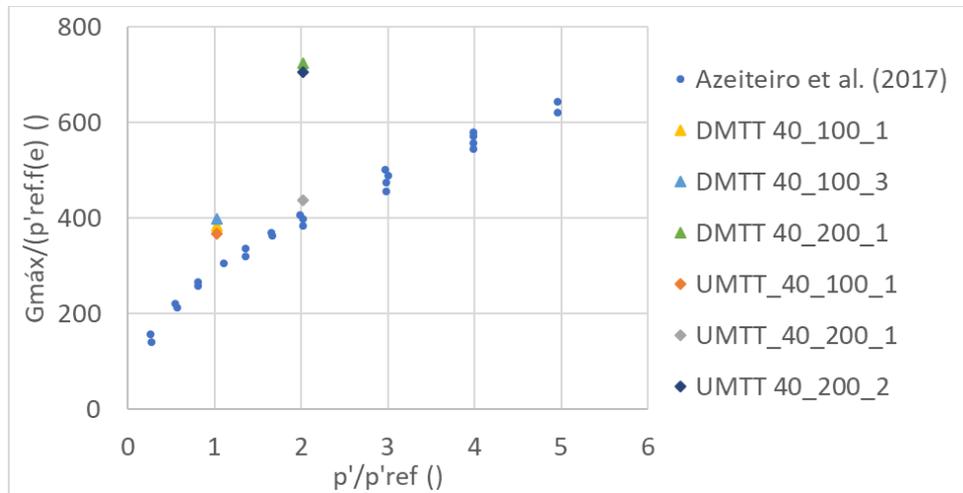


Figura 4.12 - Rigidez máxima normalizada em função da tensão efetiva normalizada (Adaptado de Azeiteiro et al., 2017).

Verifica-se que, de uma forma genérica, pelo HCA, se obtiveram valores da rigidez máxima para a areia de Hostun superiores aos obtidos por Azeiteiro et al. (2017) com recurso aos Bender Elements, BE, sendo os valores obtidos pelo HCA em média 40% superiores aos valores obtidos pelo BE. Tal não era de se esperar, tendo em conta que a norma é esperar valores superiores nos ensaios realizados no BE, já que o HCA utiliza a instrumentação local para determinar a rigidez máxima, enquanto que o BE determina a rigidez máxima segundo a velocidade de propagação de ondas (Araújo Santos, 2015). No entanto, Araújo Santos (2015), ao realizar ensaios monotónicos não drenados no HCA com areia de Coimbra obteve valores 50% superiores aos obtidos por Dias Santos (2015) nos ensaios realizados no BE com a mesma areia. Tal fenómeno já havia sido observado por Porovic (1995) que afirma que a relação da rigidez HCA-BE pode variar entre 0.65 e 1.15, quando estudou a areia de Ham River. Tal pode ser igualmente explicado através da influência da gama de deformações aplicada pelo BE na amostra. Ferreira (2008) observou que quando comparados os resultados entre ensaios de coluna ressonante e no BE na gama de deformações 10-6, obtiveram-se valores para a rigidez inicial inferiores aos obtidos pela coluna ressonante, indicando que existe influência do nível de deformação aplicado na medição da rigidez inicial, dado que no HCA a gama de deformações é de  $10^{-5}$ .

### Degradação da rigidez

A degradação da rigidez, tal como já foi expresso na secção 2.1.1, pode ser definida pela rigidez tangente ou pela rigidez secante. Na presente dissertação optou-se por definir a degradação da

rigidez pela rigidez secante. Assim, obtiveram-se os resultados presentes na Figura 4.13 para a degradação de rigidez.

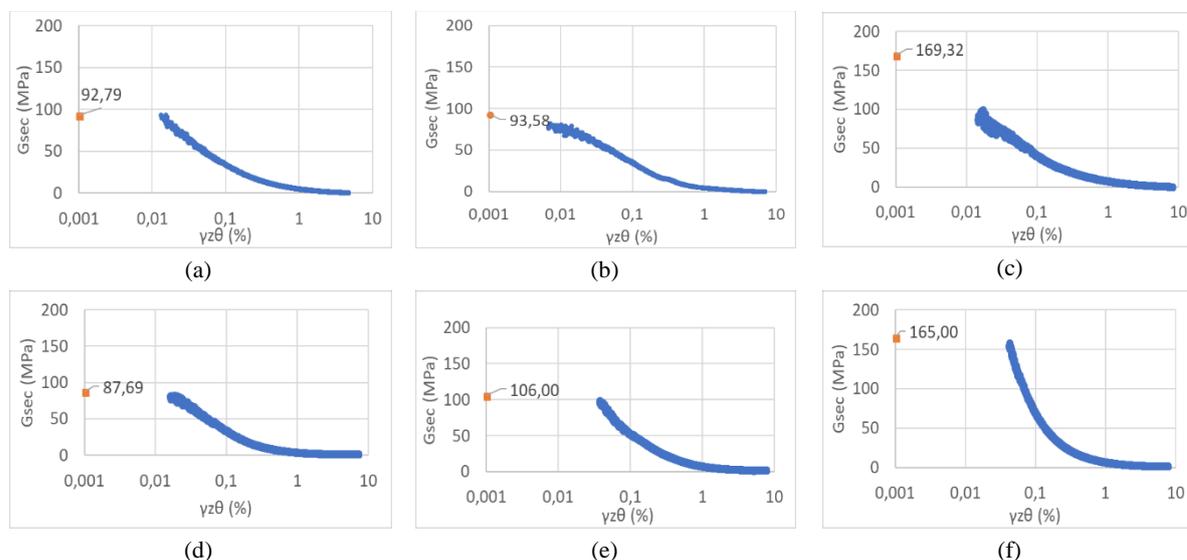


Figura 4.13 - Degradação de rigidez: (a) DMTT 40\_100\_1; (b) DMTT 40\_100\_3; (c) DMTT 40\_200\_1; (d) UMTT 40\_100\_1; (e) UMTT 40\_200\_1; (f) UMTT 40\_200\_2.

Observando os resultados obtidos e comparando com os valores obtidos para a rigidez máxima, verifica-se que os valores da rigidez inicial de cada ensaio são semelhantes aos valores de rigidez máxima, concluindo-se então que foram corretamente determinados. Em todos os ensaios realizados verifica-se que a rigidez diminui até valores muito próximos de zero, podendo observar-se ligeiramente a forma de um S invertido.

#### 4.2.4. Estado crítico

Tendo como base os resultados obtidos por Azeiteiro et al. (2017) representados na Figura 2.14, foram analisados a tensão efetiva e índice de vazios finais dos ensaios realizados no HCA, tendo obtido os resultados apresentados no Quadro 4.4. O índice de vazios no estado crítico foi calculado segundo a equação 2.18 admitindo 1.00, 0.07 e 0.36 para os parâmetros  $e_{0,ref}$ ,  $\lambda$  e  $\xi$ , respetivamente, conforme Azeiteiro et al. (2017) fez.

Quadro 4.4 - Índice de vazios e tensão média efetiva finais de todos os ensaios de corte monotónico.

Designação do ensaio	$p'_0$ (kPa)	$p'_{final}$ (kPa)	$e_0$	$e_{final}$	$e_{cr}$	$\psi$
DMTT 40_100_1	100	99.806	0.8615	0.8826	0.9300	-0.0685
DMTT 40_100_3	100	100.23	0.8789	0.9182	0.9299	-0.0510
DMTT 40_200_1	200	199.18	0.8829	0.8989	0.9103	-0.0274
UMTT 40_100_1	100	603.12	0.8669	0.8655	0.8663	0.0006
UMTT 40_200_1	200	539.17	0.8557	0.8532	0.8716	-0.0159
UMTT 40_200_2	200	550.97	0.8829	0.8781	0.8706	0.0123

Da análise do Quadro 4.4, conclui-se que apenas a amostra referente ao ensaio UMTT 40\_200\_2 é suscetível à liquefação, dado que o seu parâmetro de estado é positivo. Conclui-se também que todas as amostras referentes aos ensaios drenados têm um índice de vazios final superior ao inicial, sendo este um indicador de que todas as amostras dilataram. No que concerne às amostras referentes aos ensaios não drenados, verifica-se que o índice de vazios não varia, sendo visível uma flutuação inerente aos equipamentos de medição. Por fim, pode-se observar que nenhuma das amostras ensaiadas atingiu o estado crítico tal como previsto anteriormente, sendo que os ensaios não drenados se deslocaram para a direita, aproximando-se da linha do estado crítico e os ensaios drenados se aproximaram do estado crítico, deslocando-se na vertical ( $p'$  constante durante o ensaio). Na Figura 4.14 podem ser observados os resultados obtidos em relação à LEC proposta por Azeiteiro et al. (2017).

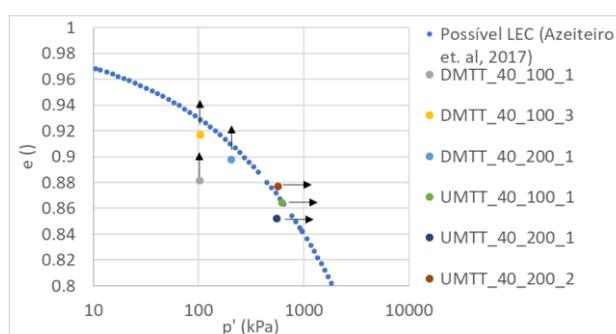


Figura 4.14 - Índice de vazios em função da tensão efetiva e possível LEC proposta por Azeiteiro et al. (2017).

Segundo o gráfico anterior, poderia concluir-se que algumas das amostras ensaiadas teriam atingido o estado crítico. No entanto, sabe-se que a atual configuração do HCA não permite impor solicitações capazes de levar uma amostra ao estado crítico. A observação da Figura 4.4 e da Figura 4.6 reforça esta ideia. Assim conclui-se que a possível LEC proposta por Azeiteiro et al. (2017) pode não ser a única LEC da areia de Hostun. Tal pode ser justificado pelo facto de as trajetórias de tensões aplicadas nos ensaios serem diferentes das aplicadas por Azeiteiro et al. (2017), levando a pensar na multiplicidade da LEC. Este fenómeno já havia sido observado por Been et al. (1991) onde se concluiu que o ângulo de resistência ao corte diminuía com o aumento do índice de vazios para tensões efetivas de confinamento inferiores a 1 MPa. Tamém Konrad (1990) sugeriu que a projeção da LEC seria obtida pela média das várias LEC obtidas para o solo em estudo.

#### 4.2.5. Estado de transformação de fase

Azeiteiro et al. (2017), tal como já foi exposto na secção 2.3.2 definiu o estado de transformação de fase para os ensaios drenados através da dilatância. No entanto, dada a complexidade do processo, para os ensaios drenados recorreu-se a um método mais simples. Na Figura 4.3, pode-se observar o ponto em que o comportamento passa de contrativo para dilatante. Assim, determinando o ponto onde a extensão volumétrica atinge o seu valor máximo

(correspondendo ao ponto de máxima contração da amostra), sabemos que esse ponto coincide com o ETF. No Quadro 4.5 podem ser observados os resultados obtidos no estado de transformação de fase, nomeadamente o índice de vazios, o parâmetro de estado e a relação de tensões no ETF.

Quadro 4.5 – Índice de vazios e tensão média efetiva no ETF de todos os ensaios de corte monotónico.

Designação do ensaio	$q_{ETF}$ (kPa)	$p'_{ETF}$ (kPa)	$e_0$	$e_{ETF}$	$e_{cr}$	$\Psi_{etf}$	$\eta_{etf}$
DMTT 40_100_1	103.10	100.43	0.8615	0.8457	0.9299	-0.0684	1.0266
DMTT 40_100_3	96.00	100.43	0.8789	0.8801	0.9299	-0.0510	0.9559
DMTT 40_200_1	215.50	199.91	0.8829	0.8887	0.9102	-0.0273	1.0780
UMTT 40_100_1	77.20	80.44	0.8669	0.8654	0.9353	-0.0684	0.9597
UMTT 40_200_1	142.10	147.40	0.8557	0.8532	0.9195	-0.0638	0.9640
UMTT 40_200_2	130.80	127.01	0.8829	0.8780	0.9237	-0.0408	1.0298

O gráfico representado na Figura 4.105 sugere que os resultados obtidos para os ensaios de torção realizados acompanham a reta dos ensaios de compressão sendo, no entanto, ligeiramente inferiores. Deve-se ter em atenção que o tipo de ensaio é diferente, logo os resultados, apesar de semelhantes no que concerne ao comportamento genérico do solo, também serão diferentes. No entanto, consegue-se observar uma tendência nos ensaios de torção, semelhante à observada nos ensaios de compressão realizados por Azeiteiro et al. (2017). Deve-se ter em atenção que Azeiteiro et al. (2017) assumiu diversas simplificações, já mencionadas na secção 2.3.2, que poderão induzir em erro durante a análise dos resultados, ao contrário do método utilizado na presente dissertação.

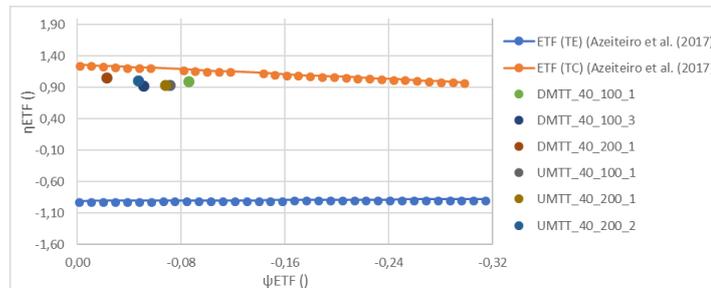


Figura 4.15 - Razão de tensões no ETF em função do parâmetro de estado.

Ao analisar os ensaios não drenados obtidos, é possível retirar que o declive da linha de transformação de fase no plano  $p' - \tau_{z\theta}$  tem o valor de 0.50, sensivelmente. Observando a Figura 4.16, verifica-se que os três ensaios monotónicos realizados formam uma reta que passa na origem com uma boa aproximação, o que permite afirmar a validade dos resultados obtidos.

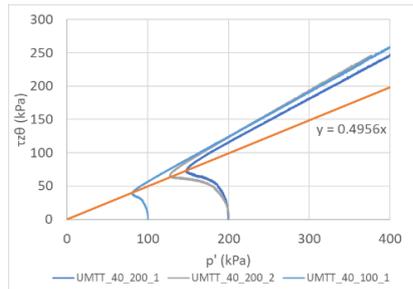


Figura 4.16 - Inclinação da LTF dos ensaios monotônicos não drenados.

Determinou-se o ângulo de resistência ao corte mobilizado no ETF para cada um dos três ensaios não drenados realizados. Para o determinar, utilizou-se o plano  $s'$ - $t$  onde:

$$s' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \tag{4.4}$$

$$t = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} = \frac{q}{2} = \tau \tag{4.5}$$

Assim, obtiveram-se os resultados representados no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Ângulo de resistência ao corte mobilizado no ETF.

Designação do ensaio	$s'$ (kPa)	$t$ (kPa)	$\Phi$ (°)
UMTT 40_100_1	80.47	38.62	28.68
UMTT 40_200_1	147.33	71.06	28.84
UMTT 40_200_2	127.07	65.38	29.48

### 4.3. Ensaios cíclicos

O procedimento para a realização de ensaios cíclicos de amostras no HCA é análogo ao utilizado para os ensaios monotônicos, tendo sido apenas necessárias algumas modificações, destacando-se a adaptação da posição de toda a instrumentação de medição de forma a permitir a medição de deformações maiores.

#### 4.3.1. Programa experimental

Realizaram-se três tipos de ensaio cíclico distintos: ensaio cíclico drenado para uma tensão efetiva de 100 kPa, ensaio cíclico não drenado para uma tensão efetiva de 200 kPa e, por fim, ensaio cíclico não drenado com deformação radial nula e uma tensão efetiva de 200 kPa. Todos os ensaios foram realizados para a mesma razão de tensões cíclicas de 0.40 e em condições de consolidação isotrópicas.

Para os ensaios cíclicos a denominação é feita da mesma forma que para os ensaios monotónicos, mudando apenas a designação de *Monotonic* para *Cyclic*, ficando então, dando o exemplo de um ensaio drenado de uma amostra com  $Dr=40\%$  e para uma tensão efetiva de 100 kPa, DCTT 40\_100\_1. No Quadro 4.7 encontram-se os ensaios cíclicos realizados e respetivas condições iniciais de cada um.

O ensaio UCTT 40\_200\_1 foi realizado com a mesma amostra do ensaio DCTT 40\_100\_1, tendo sido reconsolidada para uma tensão efetiva de 200 kPa. No entanto, manteve-se a razão de tensões cíclicas de 0.4. O ensaio UCTT 40\_200\_2 difere do ensaio UCTT 40\_200\_1 no tipo de restrição de deformação. Enquanto que no segundo, o controlo do ensaio pressupõe a manutenção de um estado plano de tensão, podendo a amostra deformar lateralmente, no primeiro impôs-se um estado plano de deformação, no qual se mantém a deformação radial nula bem como extensão axial nula. Este tipo de controlo, que difere do utilizado em investigações anteriores, nomeadamente em Araújo Santos (2015), foi realizado com o intuito de se verificar a possibilidade de controlar este tipo de ensaio mesmo com tensões efetivas nulas.

O ensaio de deformação radial nula terminou antes do previsto, pois este rapidamente atingiu tensões de 800 kPa na câmara e, por questões de segurança, o ensaio foi interrompido automaticamente pelo software graças aos alarmes previamente programados. Tal pode ter ocorrido pelo facto do tipo de controlo aplicado não ser executável. No entanto, tendo-se verificado a existência de uma fuga na interface ar/água da *outerCell* já após o fim do ensaio, não se consegue concluir inequivocamente a razão pela qual não foi possível controlar o ensaio. A rotura da interface tanto pode estar na origem do insucesso do ensaio como uma consequência do mesmo.

Quadro 4.7 - Ensaio cíclicos realizados e respetivas condições iniciais.

Ensaio	Dr (%)	$e_0$	$p'_0$ (kPa)	$u_0$ (kPa)	$q_0$ (kPa)	drenagem	Observações
DCTT 40_100_1	35.01%	0.88	100	560	0	Drenado	LVDT e Eletrólito uniaxial avariados
UCTT 40_200_1	39.53%	0.87	200	460	0	Não Drenado	LVDT e Eletrólito uniaxial avariados e amostra reconsolidada
UCTT 40_200_2	36.66%	0.88	200	460	0	Não Drenado	DRN, LVDT e eletrólito uniaxial avariados e possível fuga

#### 4.3.2. Resultados experimentais

Observando os resultados obtidos no ensaio cíclico drenado presentes na Figura 4.17, pode concluir-se que a amostra apresentou um comportamento contrativo em todo o ensaio. Pode observar-se ainda que o primeiro ciclo de deformação foi consideravelmente superior aos seguintes, indicando um aumento de rigidez. Este ensaio foi terminado por ordem do técnico após duzentos e doze ciclos dado que, conforme mencionado na secção 2.2.4, seria necessários

milhares de ciclos para atingir grandes deformações, não se dispondo de tempo para a continuação do ensaio.

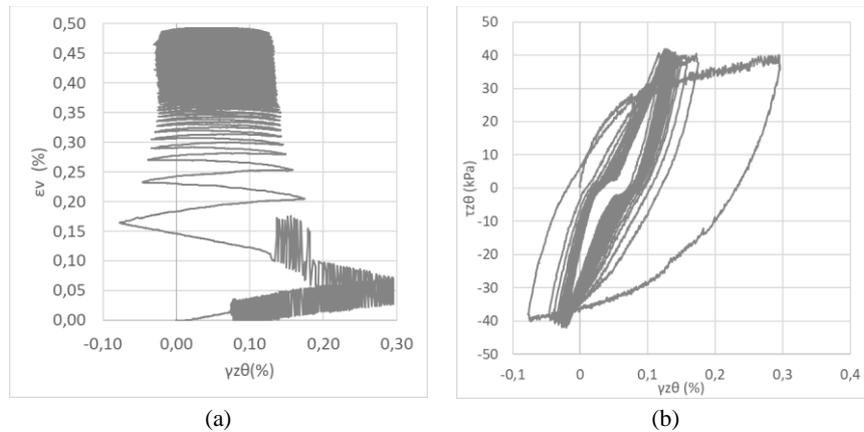


Figura 4.17 - Ensaio DCTT 40\_100\_1: (a) Extensão volumétrica-deformação; (b) Tensão-deformação.

O ensaio cíclico de corte não drenado fez seis ciclos, tendo sido interrompido devido à impossibilidade do CRSP em impor mais deformações. Tal ocorreu devido à possível existência de ar dentro do CRSP, impedindo este de impor maiores deformações. No entanto, na Figura 4.18 consegue-se observar que a cada ciclo a tensão efetiva se reduz cada vez mais e a pressão de água nos poros, apesar de oscilar, vai-se acumulando.

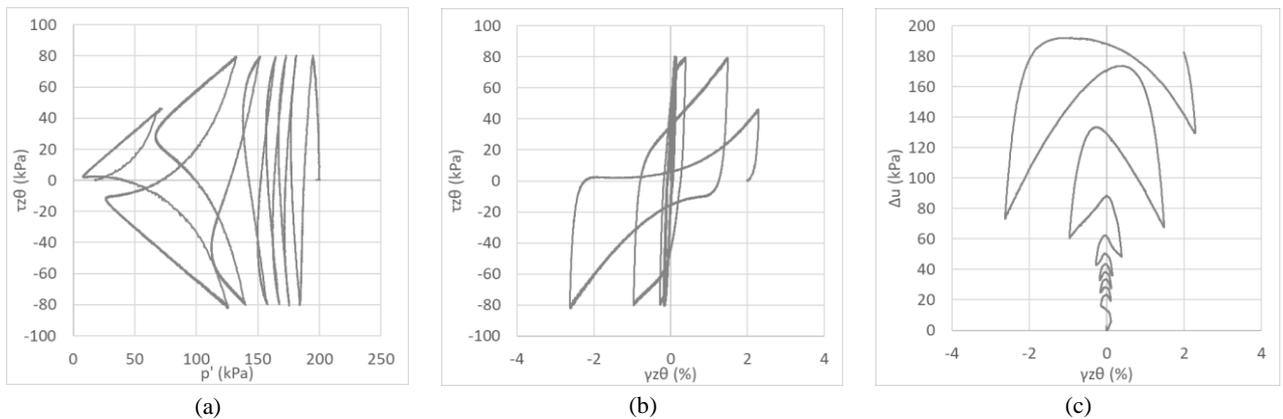


Figura 4.18 - Ensaio UCTT 40\_200\_1: (a) Trajetória de tensões; (b) tensão-deformação; (c) variação da pressão intersticial-deformação.

O ensaio não drenado com deformação radial nula, tal como já foi mencionado foi terminado pelos alarmes do programa que previnem que algum fenómeno danifique o equipamento. Na Figura 4.19 apresentam-se os resultados obtidos a partir do ensaio.

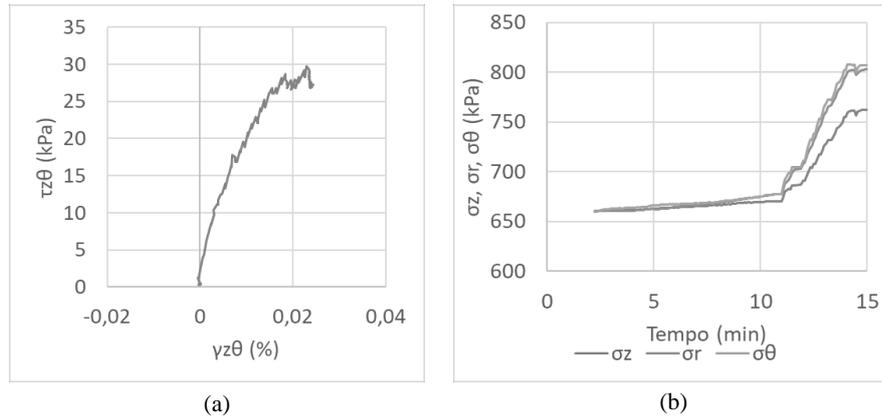


Figura 4.19 – UCTT 40\_200\_2: (a) Tensão-deformação: (b) evolução das tensões com o tempo de ensaio.

### 4.3.3. Degradação da rigidez e coeficiente de amortecimento

Devido ao eletrólito uniaxial se encontrar avariado, não foi possível determinar a rigidez máxima das amostras. No entanto, recorrendo-se às medições globais, determinou-se a degradação da rigidez secante e o coeficiente de amortecimento aplicando o modelo linear equivalente em todos os ensaios cíclicos bem sucedidos.

Para o ensaio drenado, calcularam-se ambos os parâmetros para os primeiros dez ciclos, passando posteriormente ao cálculo destes coeficientes a cada dez ciclos realizados. Pode-se concluir a partir da Figura 4.20 e Figura 4.21 que a rigidez secante e o coeficiente de amortecimento apresentam o mesmo comportamento que a areia de Lemman apresentou segundo Rascol (2009), podendo-se validar a preparação do ensaio cíclico drenado utilizando o HCA, verificando que a cada ciclo ocorre uma acumulação de extensão volumétrica que leva ao adensamento da amostra e, conseqüentemente ao aumento da sua rigidez.

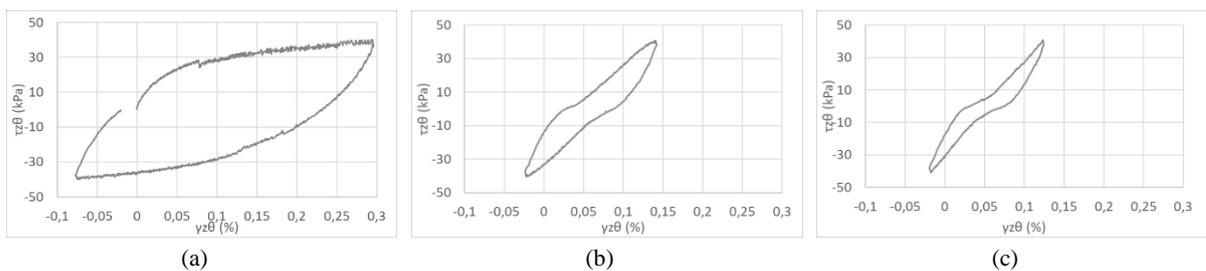


Figura 4.20 - DCTT 40\_100\_1: (a) Primeiro ciclo; (b) décimo ciclo; (c) último ciclo.

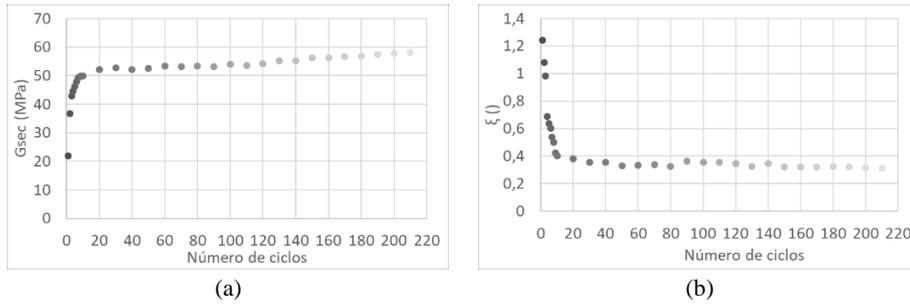


Figura 4.21 - DCTT 40\_100\_1: (a) Módulo de rigidez secante; (b) Coeficiente de amortecimento.

Analisando o ensaio não drenado e os respectivos resultados apresentados na Figura 4.22 e na Figura 4.23, observa-se que a rigidez inicial diminui a cada ciclo realizado, enquanto que o coeficiente de amortecimento aumenta. Estas observações são coerentes com o exposto na secção 2.2.1, verificando-se que a rigidez diminui com o número de ciclos, enquanto que o coeficiente de amortecimento aumenta em condições não drenadas.

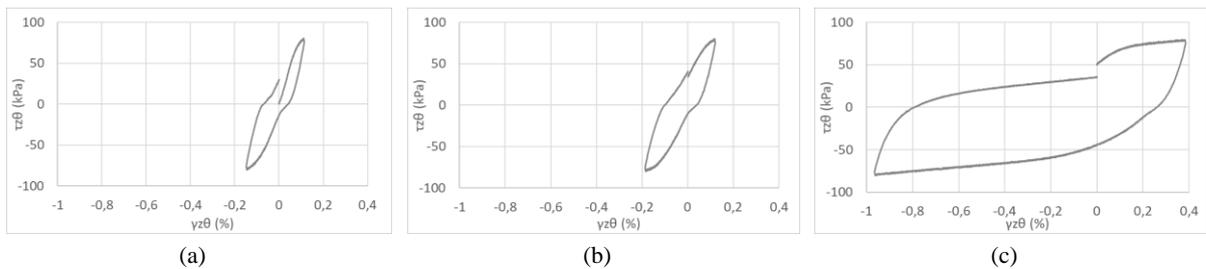


Figura 4.22 - UCTT 40\_200\_1: (a) Primeiro ciclo; (b) terceiro ciclo; (c) quinto ciclo.

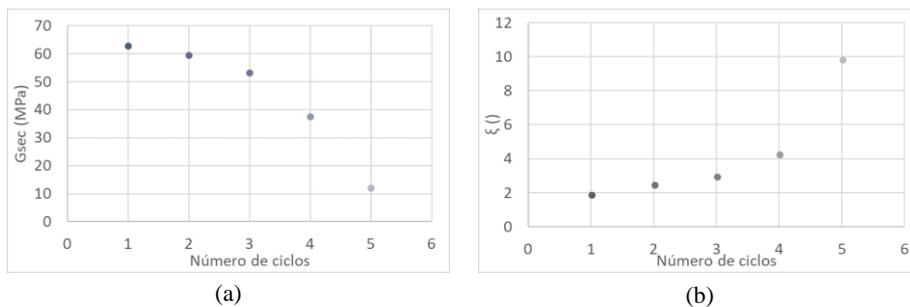


Figura 4.23 - UCTT 40\_200\_1: (a) Módulo de rigidez secante; (b) coeficiente de amortecimento.

#### 4.3.4. Resposta cíclica da areia de Hostun no domínio das grandes deformações

Durante o ensaio cíclico drenado, não se atingiram as grandes deformações em momento algum, tendo sido atingidas deformações com uma dupla amplitude de 0.50%. No ensaio cíclico não drenado já se atingiram valores de deformação elevados, com uma dupla amplitude de 4.50%. Tendo em conta que a tensão efetiva diminui a cada ciclo, diminuindo cada vez mais

drasticamente até valores próximos de zero, pode-se afirmar que estamos perante o fenómeno de mobilidade cíclica.

Observando na Figura 4.24 a projeção da LTF obtida pelos UMTT no ensaio UCTT 40\_200\_1, verifica-se que a projeção caracteriza bem a transição do comportamento contrativo para dilatante do ensaio cíclico, tendo-se obtido um ângulo de resistência ao corte de  $26^\circ$ . Este valor, quando comparado com o obtido pelos ensaios monotónicos de  $29^\circ$ , pode-se considerar um valor coerente, sugerindo que o ETF tem características idênticas em ambos os casos.

Na Figura 4.24 observa-se também que após o sentido do corte na amostra se inverte, esta se encaminha para um novo ETF até atingir tensões efetivas nulas, que para o presente caso ocorreria no ciclo seguinte.

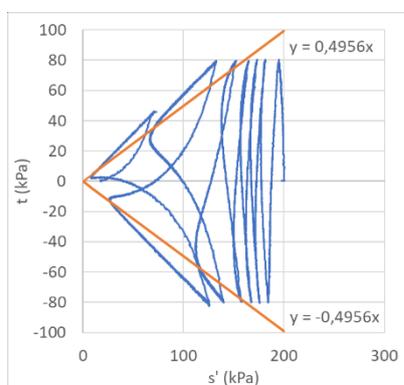


Figura 4.24 - Trajetória de tensões do ensaio UCTT 40\_200\_1.

## 5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTO FUTURO

Com a presente dissertação pretendeu-se reproduzir a resposta da areia de Hostun quando sujeita a diversos tipos de condições. Realizaram-se ensaios de corte drenados e não drenados em amostras soltas sujeitas a solicitações monotónicas ou cíclicas. Findo o trabalho, resumem-se as principais conclusões tiradas do mesmo, bem como os possíveis caminhos a seguir posteriormente.

### 5.1. Conclusões

O procedimento desenvolvido para a preparação de amostras permitiu preparar amostras cilíndricas ocas uniformes, tendo o HCA demonstrado a sua versatilidade neste tipo de ensaios. Os ensaios drenados de corte monotónico permitem observar que a amostra contrai inicialmente mas, após um determinado nível de deformação, passa a dilatar, indicando que atingiu o ETF. Os ensaios não drenados de corte monotónico também permitem observar que a amostra atingiu o ETF no momento em que a tensão media efetiva deixa de diminuir e passa a aumentar. Em todos os ensaios se verifica que as pequenas variações da densidade relativa e a tensão efetiva aplicada na amostra têm grande influência nos valores de rigidez inicial. Por outro lado, no que se refere ao estado crítico, as diferenças observadas para os resultados de Azeiteiro et al (2017), que fez ensaios de compressão e extensão, diferentes dos ensaios de torção realizados, levam a questionar a unicidade da LEC. Isto deve-se ao facto de os ensaios realizados não terem atingido o estado crítico quando foram terminados, devido à limitação de curso do HCA, estando no entanto à volta da LEC proposta por Azeiteiro et al. (2017).

Os ensaios cíclicos realizados abrangem três situações diferentes: ensaio drenado, ensaio não drenado e ensaio não drenado com deformação radial nula. O ensaio drenado foi interrompido dado a impossibilidade de o levar até ao fim, pois seriam necessários milhares de ciclos. O ensaio não drenado foi interrompido pois o CRSP não conseguiu induzir mais deformação à amostra, levando ao fim do ensaio antes de se atingir a máxima deformação que se conseguia induzir. Em relação ao ensaio não drenado com deformação radial nula, este atingiu valores de tensão na câmara na gama dos 800 kPa, atingindo o limite de segurança imposto. Neste caso, pensa-se ter ocorrido uma de duas coisas: o controlo realizado não é válido ou a membrana da interface ar/água da *outerCP* furou e o equipamento descontrolou-se. Dada a impossibilidade de verificar se a membrana já estava furada antes de se atingirem os níveis de tensão atingidos, é impossível determinar o que levou ao descontrolo da tensão aplicada.

Em relação aos resultados em geral, estes permitiram concluir o seguinte: ocorre sempre degradação da rigidez, com exceção das amostras de areia solta sujeita a um carregamento cíclico sob condições drenadas, onde devido ao adensamento da amostra, a rigidez passou de valores como 20 MPa para cerca de 60 MPa. Os valores da rigidez inicial obtidos para os ensaios monotônicos são validados quando comparados com investigações anteriores, tendo havido, no entanto uma possível alteração geométrica na amostra UMTT 40\_200\_1, dado que este resultado foge da regra. Em relação ao coeficiente de amortecimento, este aumenta a cada ciclo no ensaio não drenado. Já no ensaio drenado ocorre o inverso, mostrando que o seu comportamento é inversamente proporcional ao da rigidez. Os resultados iniciais da investigação aqui apresentados apontam para valores da rigidez máxima da areia de Hostun ligeiramente superiores aos obtidos para a mesma areia por outros autores em outros equipamentos, entre eles os *Bender Elements*. As diferenças encontradas, que apesar de tudo se podem considerar pequenas em termos relativos, podem ser justificadas pelos erros de medição e/ou interpretação dos resultados que podem afetar os valores obtidos. Tal pode ser igualmente explicado através da influência da gama de deformações aplicada pelo BE na amostra. Ferreira (2008) observou que quando comparados os resultados entre ensaios de coluna ressonante e no BE na gama de deformações 10-6, se obtiveram valores para a rigidez inicial inferiores aos obtidos pela coluna ressonante, indicando que existe influência do nível de deformação aplicado na medição da rigidez inicial.

## 5.2. Desenvolvimento futuro

Os trabalhos propostos de seguida pretendem complementar o trabalho desenvolvido para a presente dissertação, com base na suas conclusões e limitações do trabalho realizado. A realização de ensaios iguais aos apresentados, mas com maior nível de deformação é importante para definir uma possível LEC. É igualmente importante realizar ensaios análogos para um maior número de tensões efetivas diferentes e densidades relativas diferentes, para complementar a informação existente e validar a utilização deste método numa gama de ensaios mais ampla. Torna-se importante estudar a influência que cada tipo de equipamento laboratorial tem na determinação da rigidez máxima do solo já que, apesar de ser comumente aceite que os valores obtidos através da instrumentação local são inferiores em relação aos obtidos através de propagação de ondas, são várias as situações em que tal não se tem verificado. A realização de ensaios cíclicos drenados não é tão usual dado o tempo exigido para o efeito. No entanto, a análise da resposta da areia sob estas condições torna-se bastante interessante para verificar a validade dos resultados obtidos para a rigidez e coeficiente de amortecimento, bem como analisar o comportamento no domínio das grandes deformações. Propõe-se também repetir ensaios de deformação radial nula com controlo através da extensão axial para validar o controlo efetuado, uma vez que estes ensaios simulam melhor as condições de fronteira *in situ*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, É. J. A. (2012). “Estudo das condições de liquefação da areia de Coimbra em triaxial estático e cíclico”. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto.
- Araújo Santos, L. M. (2015). “Caracterização e modelação do comportamento mecânico da areia de Coimbra sob ações generalizadas”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Atkinson, J. H. (2000). “Non-linear stiffness in routine design”. *Géotechnique* 50, No. 5, pp. 487-508.
- Azeiteiro R.J.N., Coelho P.A.L.F., Tabora D.M.G, Grazina J.C.D. (2017). “Critical state–based interpretation of the monotonic behavior of Hostun Sand”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*.
- Been, K., Jefferies, H. G., Hachey, J. E. (1991). “The critical state of sands”. *Géotechnique* 41, No. 3, pp. 365-381.
- Been, K., Jefferies, M. (1985). “A state parameter for sands”. *Géotechnique* 35, No. 2, pp. 99-112.
- Benz, T. (2007). “Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences”. PhD Thesis in the Faculty of Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, University of Stuttgart, Stuttgart.
- Burland, J. B., Symes, M. (1982). “A simple axial displacement gauge for use in the triaxial apparatus”. *Géotechnique* 32, No. 1, pp. 62-65.
- Casagrande, A. (1936). “Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills”. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, January, pp. 257-275.
- Castro, G. (1975). “Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands”. *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 101, GT6, pp. 551-569.
- Castro, G. e Poulos, S. J. (1977). “Factors affecting liquefaction and cyclic mobility”. *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 106, GT6, pp. 501-516.

- 
- Chern, J. C. (1985). “Undrained response of saturated sands with emphasis on liquefaction and cyclic mobility”. PhD Thesis, University of British Columbia, Vancouver.
- Clayton, C. R. I. (2011). “Stiffness at small strain: research and practice”. *Géotechnique* 61, No. 1, pp. 5-37.
- Coelho, P. A. L. d. F. (2007). “In situ densification as a liquefaction resistance measure for bridge foundations”. PhD Thesis, University of Cambridge, Cambridge.
- Coop, M.R. (2003). “On the mechanics of reconstituted and natural sands”. *Deformation Characteristics of Geomaterials*, Vol. 2, pp. 29-58.
- Coop, M.R., Atkinson, J.H. (1993). “The mechanics of Cemented Carbonate Sands”. *Géotechnique* 43, No. 1, pp. 53-67.
- Darendeli, M. B. (2001). “Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves”. PhD Thesis, University of Texas at Austin.
- Doanh, T., Ibraim, E. (2000). “Minimum undrained strength of Hostun RF sand”. *Géotechnique* 50, No. 4, pp. 377-392.
- Ferreira, C. M. F. (2008). “The Use of Seismic Wave Velocities in the Measurement of Stiffness of a Residual Soil”. Tese de Doutorado, Universidade do Porto, Porto.
- Flavigny, E., Desrues, J., and Palayer, B. (1990). “Le sable d’Hostun «RF»”. *Revue Française de Géotechnique* 53, pp. 67–69 (in French).
- Gajo, A., Muir Wood, D. (1999). “Severn-Trent sand: A kinematic-hardening constitutive model: The q-p formulation”. *Géotechnique* 49, No. 5, pp. 595–614.
- Hardin, B. O., Black, W. L. (1968). “Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay”. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 94 (SM2), 353-369.
- Hardin, B. O., Richart, F. E. (1963). “Elastic wave velocities in granular soils”. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 89 (SM1), 33-65.
- Hoque, E., Tatsuoka, F. (2000). “Kinematic elasticity of a granular material”. *GeoEng2000*, Melbourne.
- Ishibashi, I., Zhang, X. (1993). “Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay”. *Soils and Foundations* 33, No. 1, pp. 182-191.

- 
- Ishihara, K. (1996). “Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics”. Oxford Science Publications, Oxford, New York, USA.
- Ishihara, K., Takatsu, H. (1979). “Effects of overconsolidation and  $K_0$  conditions on the liquefaction characteristics of sands”. *Soils and Foundations* 19, No. 4, pp. 69-68.
- Ishihara, K., Tatsuoka, F., Yasuda, S. (1975). “Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses”. *Soils and Foundations* 15, No. 1, pp. 29-44.
- Jefferies, M., Been, K. (2006). “Soil Liquefaction: a critical state approach”. Taylor & Francis, Abington.
- Kim, J., Kazama, M. e Kwon, Y. (2013). “Effects of relative density and accumulated shear strain on post-liquefaction residual deformation”. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 2567-2577.
- Konrad, J.-M. (1993). “Undrained response of loosely compacted sands during monotonic and cyclic compression tests”. *Géotechnique* 43, No. 1, pp. 69-89.
- Konrad, J.-M. (1990). “Minimum undrained strength of two sands”. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116 (6): 932-947. Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Li, X. S., Wang, Y. (1998). “Linear representation of steady-state line for sand”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 124, No. 12, pp. 1215-1217.
- Lo Presti, D. C. F., Pallara, O., Lancellotta, R., Armandi, M., Maniscalco, R. (1993). “Monotonic and cyclic loading behaviour of two sands at small strains”. *Geotechnical Testing Journal* 16, No. 4, pp. 409-424.
- Menkiti, O. C. (1994). “Behaviour of clay and clayed-sand, with particular reference to principal stress rotation”. PhD Thesis, Imperial College London, London.
- Minh, N. A. (2006). “An investigation of the anisotropic stress-strain-strength characteristics of an Eocene clay”. PhD Thesis, Imperial College London, London.
- National Programme on Technology Enhanced Learning* (N/D):  
<http://nptel.ac.in/courses/105103097/50> (Acedido em 02/04/2018).
- Nishimura, S. (2005). “Laboratory study on anisotropy of natural London clay”. PhD Thesis, Imperial College London, London.
-

- 
- Porovic, E. (1995). “Investigations of soil behaviour using a resonant-column torsional shear hollow-cylinder apparatus”. PhD Thesis, Imperial College London, London.
- Poulos, S. J. (1981). “The steady state of deformation”. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107 (GT5), 553-562.
- Rascol, É. (2009). “Cyclic properties of sand: dynamic behaviour for seismic applications”. *Thèse de Doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.*
- Robertson, P. K. (1994). “Design considerations for liquefaction”. *Proc. 13th ICSMFE, New Delhi [Citado por Abreu (2012)].*
- Saada, A., Puccini, P., Bianchini, G. (1989). “Information package. Proc., Int. Workshop on Constitutive Equations for Granular Non-Cohesive Soils”, Cleveland, Balkema, Rotterdam: 81–88.
- Santos, J. A., Correia, A. G. (2002). “Distorção limite de referência. Sua utilidade para estabelecimento de uma curva de degradação do solo – 1º parte”. *Revista Geotecnia, Julho, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa.*
- Seed, H. B., Idriss, I. M. (1971). “Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potencial”. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division* 97 (SM9), 1249-1273.
- Seed, H. B., Idriss, I. M. (1970). “Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses”. *EERC - Earthquake Engineering Research Center.*
- Shibuya, S. (1985). “Undrained behaviour of granular materials under principal stress rotation”. PhD Thesis, Imperial College London, London.
- Symes, M. J. P. R. (1983). “Rotation of principal stresses in sand”. PhD Thesis, Imperial College London, London.
- Taborda, D. M. G. (2011). “Development of constitutive models for application in soil dynamics”. PhD Thesis, Imperial College London, London.
- Vucetic, M. e Dobry, R. (1991). “Effect of soil plasticity on cyclic response”. *Journal of Geotechnical Engineering* 117, No. 1, pp. 89-107.
- Vucetic, M. e Dobry, R. (1987). “Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits”. *IS on Geotechnical Engineering of Soft Soils 2, Cidade do México, pp. 51-87.*
- Wichtmann, T. (2005). “Explicit accumulation model for non-cohesive soils under cyclic loading”. PhD Thesis, Ruhr-Universität Bochum, Bochum.
-

Zdravkovic, L. (1996). “The stress-strain-strength anisotropy of a granular medium under general stress conditions”. PhD Thesis, Imperial College London, London.