



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Joaquim André Oliveira Rosa

BIOTECNOLOGIA EM SOLOS. EFEITO DA
PRECIPITAÇÃO DE CaCO_3 POR VIA ENZIMÁTICA NO
COMPORTAMENTO DE UMA AREIA SILTOSA

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de
Especialização em Geotecnia orientada pelo Professor Doutor Paulo
José da Venda Oliveira e apresentada ao Departamento de
Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia

Julho de 2019



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Joaquim André Oliveira Rosa

**BIOTECNOLOGIA EM SOLOS. EFEITO DA
PRECIPITAÇÃO DE CaCO_3 POR VIA ENZIMÁTICA NO
COMPORTAMENTO DE UMA AREIA SILTOSA**

**BIOTECHNOLOGY IN SOILS. EFFECT OF THE ENZYMATIC CaCO_3 PRECIPITATION
ON THE BEHAVIOUR OF A SILTY SAND**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em
Geotecnia orientada pelo Professor Doutor Paulo José da Venda Oliveira e
apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da
Faculdade de Ciências e Tecnologia

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.

Julho de 2019

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho não seria possível sem o apoio e a ajuda de docentes, funcionários, colegas, amigos e familiares que ao longo de todo o percurso contribuíram para a realização desta dissertação e, por isso mesmo, expresse um profundo agradecimento:

Ao Professor Doutor Paulo da Venda, orientador desta dissertação, por toda a disponibilidade prestada e por todo o apoio e orientação ao longo do desenvolvimento da mesma.

Ao Professor Doutor António Alberto por ter facultado a aplicação que converte os dados do ensaio edométrico para o excel, que muito facilitou a interpretação dos dados.

A todo o corpo docente da área de Geotecnia pelos conhecimentos transmitidos e por estarem sempre disponíveis para qualquer esclarecimento, em especial, ao Professor Almeida e Sousa, Professor e Homem que muito admiro pela sua forma cativante e inspiradora de ser.

Ao Senhor José António por toda a ajuda prestada no Laboratório e por toda a paciência e amizade demonstrada nesta caminhada.

Aos meus amigos e colegas, em particular ao Diogo Cabral, ao Manuel Santos e ao Pedro Martins por estarem sempre ao meu lado e pela partilha de grandes momentos ao longo da vida académica.

À Doutora Ana Borba por todo o auxílio prestado no laboratório de Engenharia Química, nomeadamente na execução da solução tampão de fosfato de sódio.

Ao Engenheiro Nelson Duarte e ao técnico António Fonseca do IPN pela realização dos ensaios XRD e SEM e por toda ajuda prestada na interpretação dos resultados.

A toda a minha Família, aos meus pais, à minha irmã e aos meus avós, em particular ao meu querido avô, por toda a educação e apoio incondicional prestado ao longo da minha vida.

À minha namorada, Filipa, por estar sempre ao meu lado nos bons e maus momentos, por saber ouvir e saber sempre o que dizer nos momentos certos.

A todos eles, o meu sincero obrigado!

RESUMO

A Biotecnologia aplicada, nomeadamente a precipitação de carbonato de cálcio por via enzimática, é uma técnica recente e promissora de melhoria dos solos. Como tal, o presente trabalho visa contribuir para o desenvolvimento da técnica de bioestabilização, analisando o efeito da variação do tempo de cura e a variação da dosagem da solução estabilizadora na resistência e na deformabilidade de uma areia siltosa bioestabilizada.

Na primeira fase procedeu-se à caracterização geotécnica do solo em estudo, através da avaliação da composição granulométrica, dos limites de consistência, da densidade das partículas do solo, do teor em água óptimo resultante do ensaio de Proctor e do valor do pH do solo natural.

Na segunda fase do trabalho determinou-se a resistência à compressão não confinada e o módulo de deformabilidade não confinado através de ensaios UCS e a deformabilidade do solo, nomeadamente, o índice de compressibilidade, o índice de recompressibilidade e a tensão de cedência através de ensaios edométricos. Adicionalmente, realizou-se a medição do teor de CaCO_3 , a medição do valor de pH e o controlo do teor em água dos provetes de solo bioestabilizados.

A terceira fase consistiu em aferir a presença de calcite no solo bioestabilizado através de ensaios SEM (Scanning Electron Microscops) e ensaios XRD (X-Ray Diffraction).

O desenvolvimento do presente trabalho permitiu concluir que o aumento da concentração dos agentes estabilizadores (ureia, cloreto de cálcio e *urease*) induz no solo um ganho de resistência, de rigidez e o aumento da tensão de cedência. Os resultados sugerem ainda que o aumento do tempo de cura em câmara húmida promove o aumento dos parâmetros anteriormente mencionados.

Palavras-chave: Biotecnologia, Bioestabilização, CaCO_3 , Areia, Argila, pH, Ensaio de compressão simples, Ensaio edométrico, SEM, XRD, Resistência, Deformabilidade.

ABSTRACT

Biotechnology, namely the use of enzymes to promote calcite precipitation, is a recent and promising technique for soil improvement. Thus, the present work aims to contribute to the study of the biostabilization process by analyzing the effect of curing time and variation of the amount of the stabilizing solution on resistance and deformability of the silt-sand soil.

In the first phase, the geotechnical characterization of the soil was evaluated through the granulometric composition, the consistency limits, the soil particle density, the optimum water content from the Proctor test and the pH value of the natural soil.

In the second phase of the work, the unconfined compression strength and the deformability modulus were evaluated from UCS tests while the compressibility index, recompressibility index and pre-consolidation stress were evaluated from oedometric tests. In addition, there were also performed the measurement of the CaCO_3 content and the pH value as well as the control of the water content of biostable soil.

The third phase consisted in measuring the presence of calcite in the biostable soil through SEM (Scanning Electron Microscops) and XRD (X-Ray Diffraction) tests.

The development of the present work allowed to conclude that the increase of concentration of the stabilizing agents (urea, calcium chloride and *urease*) induces a gain in the resistance and in the deformability modulus, as well as an increase of the pre-consolidation stress. The results also suggest that the increase of the curing time in humid chamber promotes the increase of the previously mentioned parameters.

Keywords: Biotechnology, Biostabilization, CaCO_3 , Sand, Clay, pH, Unconfined compression test, Oedometer test, SEM, XRD, Strength, Deformability.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS.....	ix
SIMBOLOGIA	x
ABREVIATURAS.....	xi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento geral.....	1
1.2 Estrutura da dissertação	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Biotecnologia e o desenvolvimento sustentável	3
2.2 Biotecnologia aplicada. Bioestabilização	4
2.3 Precipitação do carbonato de cálcio por via enzimática.....	8
2.4 Grandezas básicas do solo	10
2.5 Compressibilidade e consolidação dos solos	11
2.6 Parâmetros de compressibilidade dos solos.....	14
2.7 Aplicação do método de Casagrande	15
3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	17
3.1 Introdução	17
3.2 Granulometria do solo	17
3.3 Limites de consistência ou de Atterberg.....	18
3.4 Densidade das partículas do solo	18
3.5 Ensaio Proctor Normal	19
3.6 Medição do pH.....	19
3.7 Classificação do solo	20
3.7.1 Classificação unificada dos solos	20
3.7.2 Triângulo de Feret	20
4 PROCEDIMENTO LABORATORIAL E PLANO DE ENSAIOS	22
4.1 Características dos provetes do solo.....	22
4.2 Preparação dos provetes de solo	23
4.2.1 Descrição da preparação	23
4.2.2 Materiais utilizados.....	25
4.2.3 Preparação da solução estabilizadora	26

4.2.4	Compactação dos provetes.....	28
4.3	Ensaio de compressão simples não confinada (UCS)	28
4.3.1	Descrição do ensaio UCS.....	29
4.3.2	Tratamento de dados.....	32
4.4	Ensaio edométrico	33
4.4.1	Descrição do equipamento	33
4.4.2	Descrição do ensaio edométrico	35
4.5	Medição do precipitado CaCO_3	38
4.5.1	Calibração	38
4.5.2	Medição do teor de CaCO_3 nos provetes após os ensaios UCS	39
4.6	Medição do teor em água dos provetes após os ensaios UCS	40
4.7	Medição do pH do solo bioestabilizado após os ensaios UCS	40
4.8	Ensaio XRD.....	40
4.9	Ensaio SEM.....	41
4.10	Plano de ensaios	41
4.10.1	Ensaio de compressão simples (UCS)	42
4.10.2	Ensaio edométrico	42
5	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	43
5.1	Efeito da variação do tempo de cura em câmara húmida	44
5.1.1	Resistência à compressão (q_u) e módulo de deformabilidade (E_{u50})	44
5.1.2	Teor do carbonato de cálcio e pH do solo bioestabilizado	45
5.1.3	Parâmetros da compressibilidade do solo	47
5.1.4	Relação entre a resistência (q_u) e a tensão de cedência (σ'_p).....	49
5.2	Efeito da variação da dosagem da solução estabilizadora	49
5.2.1	Resistência à compressão (q_u) e módulo de deformabilidade (E_{u50})	49
5.2.2	Teor do carbonato de cálcio e pH do solo.....	51
5.2.3	Parâmetros da compressibilidade do solo	53
5.2.4	Relação entre a resistência (q_u) e a tensão de cedência (σ'_p).....	56
5.3	Ensaio XRD	56
5.4	Ensaio SEM	57
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59
6.1	Conclusões	59
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
	ANEXO A	A-1
	ANEXO B	B-1
	ANEXO C	C-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Evolução do número de artigos em revistas científicas com a expressão desenvolvimento sustentável nos anos 1988-2010 (Torgal e Jalali, 2010).....	3
Figura 2.2 - Testes UCS; efeito do tipo de solo e da concentração da enzima <i>urease</i> na resistência à compressão não confinada (adaptado de Venda Oliveira et al., 2016).	4
Figura 2.3 - Testes UCS; efeito do tipo de solo e da concentração da enzima <i>urease</i> no módulo de deformabilidade (adaptado de Venda Oliveira et al., 2016).....	5
Figura 2.4 - Testes UCS; variação do q_u e do E_{u50} com o aumento do tempo de cura (Carmona et al., 2018).....	5
Figura 2.5 - Areia de Toyoura bioestabilizada: a) Esquema de preparação; b) Condições experimentais para a realização de testes UCS (adaptado de Yasuhara et al., 2012).....	6
Figura 2.6 - Relação entre a resistência e o precipitado de carbonato de cálcio para os provetes bioestabilizados (Yasuhara et al., 2012).	6
Figura 2.7 - Amostra de solo bioestabilizado (bio-1): a) Ensaio XRD; b) Ensaio SEM (Yasuhara et al., 2012).	7
Figura 2.8 - Ensaio edométrico sobre um solo mole estabilizado e não estabilizado (Venda Oliveira et al., 2013).	7
Figura 2.9 - Esquema do processo de precipitação do carbonato de cálcio por via enzimática (Yasuhara et al., 2012).	8
Figura 2.10 - Imagem microscópica de cristais calcite entre duas partículas de areia (Al-Thawadi, 2011).	9
Figura 2.11 - Massa de CaCO_3 em função das concentrações ureia-cloreto de cálcio e de <i>urease</i> (Carmona et al., 2018).	9
Figura 2.12 - Grandezas básicas do solo (adaptado de Matos Fernandes, 2011).	10
Figura 2.13 - Analogia de Terzaghi para os fenómenos do carregamento e da consolidação de estratos confinados de argila (Matos Fernandes, 2011).	11
Figura 2.14 - Correspondência entre o modelo de Terzaghi e o carregamento de um estrato confinado (Matos Fernandes, 2011).	12
Figura 2.15 - Carregamento de um estrato confinado de argila (Matos Fernandes, 2011): a) Condições do maciço e do carregamento; b) Evolução com o tempo de estado de tensão num ponto genérico do estrato de argila.	13
Figura 2.16 - Diagramas da tensão efectiva vertical vs índice de vazios de uma amostra de argila do Baixo Mondego, submetida a um ensaio edométrico (Coelho, 2000): a) Tensão efectiva vertical em escala aritmética; b) Tensão efectiva vertical em escala logarítmica.	14
Figura 2.17 - Aplicação do método de Casagrande para a determinação da tensão de pré-consolidação (Matos Fernandes, 2011).....	16

Figura 3.1 - Curva granulométrica para o solo em estudo.	18
Figura 3.2 - Ensaio do Proctor Normal (Leve).	19
Figura 3.3 - Classificação granulométrica dos solos pelo triângulo de Feret (E219, 1968). ...	21
Figura 4.1 - Legenda dos provetes utilizados na montagem da amostra para o ensaio UCS e para o ensaio edométrico.	23
Figura 4.2 - Ilustração passo-a-passo da preparação dos provetes de solo.	25
Figura 4.3 - Agentes estabilizadores usados na preparação da solução estabilizadora: a) Cloreto de cálcio; b) Ureia; c) Enzima <i>urease</i>	26
Figura 4.4 - Legenda da prensa usada nos ensaios UCS.	29
Figura 4.5 - Ilustração passo-a-passo do ensaio UCS.	31
Figura 4.6 - Correção do <i>bedding error</i> na curva $q_u - \epsilon$	33
Figura 4.7 - Descrição do edômetro de pequena capacidade.	34
Figura 4.8 - Legenda da célula edométrica.	34
Figura 4.9 - Ilustração passo-a-passo do ensaio edométrico.	37
Figura 4.10 - Sistema de medição do carbonato de cálcio: a) Esquema teórico (Neupane et al., 2015); b) Esquema real.	38
Figura 4.11 - Calibração do sistema de medição do carbonato de cálcio a partir do dióxido carbono libertado.	39
Figura 4.12 - Realização do ensaio XRD: a) Equipamento usado no ensaio: Philips X'Pert; b) Interpretação de resultados <i>in situ</i>	40
Figura 4.13 - Realização do ensaio SEM: a) Microscópio Zeiss Merlin Gemini II; b) Interpretação de resultados <i>in situ</i>	41
Figura 5.1 - Curvas tensão - extensão ($q_u - \epsilon_a$) para os ensaios UCS realizados sobre os provetes de solo bioestabilizados (para a solução estabilizadora base).	44
Figura 5.2 - Resistência à compressão não confinada (q_u) e módulo de deformabilidade (E_{u50}) vs tempo de cura em câmara húmida (para a solução estabilizadora base).	45
Figura 5.3 - Valores do pH e do teor de CaCO_3 do solo bioestabilizado vs tempo de cura em câmara húmida (para a solução estabilizadora base).	45
Figura 5.4 - Valores da resistência à compressão (q_u) e do módulo de deformabilidade (E_{u50}) do solo estabilizado: a) Em relação ao teor de CaCO_3 ; b) Em relação ao pH.	46
Figura 5.5 - Curvas $\log \sigma'_v - e$ para os ensaios edométricos realizados sobre os provetes de solo bioestabilizados (para a solução estabilizadora base).	47
Figura 5.6 - Valores da tensão vertical de cedência vs tempo de cura (para a solução estabilizadora base).	48
Figura 5.7 - Valores do índice de compressibilidade (C_C) e do índice de recompressibilidade (C_R) vs tempo de cura (para a solução estabilizadora base).	48
Figura 5.8 - Regressão linear entre os valores da resistência à compressão (q_u) e os valores de tensão de cedência (σ'_p) (para a solução estabilizadora base).	49
Figura 5.9 - Curvas tensão - extensão ($q_u - \epsilon_a$) para os ensaios UCS realizados sobre os provetes de solo bioestabilizados (para as diferentes soluções estabilizadoras).	50

Figura 5.10 - Parâmetros mecânicos e respectivos ganhos para as diferentes soluções estabilizadoras: a) Resistência à compressão (q_u); b) Módulo de deformabilidade (E_{u50}).....	51
Figura 5.11 - Valores do pH e do teor de CaCO_3 para as diferentes soluções estabilizadoras.	52
Figura 5.12 - Valores da resistência à compressão (q_u) e do módulo de deformabilidade (E_{u50}) para as diferentes soluções estabilizadoras: a) Em relação ao teor de CaCO_3 ; b) Em relação ao pH do solo bioestabilizado.	53
Figura 5.13 - Curvas $\log \sigma'_v - e$ para os ensaios edométricos realizados sobre os provetes de solo bioestabilizados (para as diferentes soluções estabilizadoras).....	54
Figura 5.14 - Parâmetros medidos para as diferentes soluções estabilizadoras: a) Tensão vertical de cedência (σ'_p); b) Índice de compressibilidade (C_C) e índice de recompressibilidade (C_R).....	55
Figura 5.15 - Regressão linear entre os valores da resistência à compressão (q_u) e os valores de tensão vertical de cedência (σ'_p) (para as diferentes soluções estabilizadoras).	56
Figura 5.16 - Ensaio XRD sobre a amostra bioestabilizada <i>ucl1,5_tc14</i>	56
Figura 5.17 - Ensaio SEM sobre uma amostra não estabilizada: a) Imagem ampliada da amostra; b) Perfil químico da amostra; c) Mapeamento da amostra.	57
Figura 5.18 - Ensaio SEM sobre uma amostra estabilizada <i>ucl1,5u8_tc14</i> : a) Imagem ampliada da amostra; b) Perfil químico da amostra; c) Mapeamento do elemento Ca sobre a amostra.	58

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Classificação dos solos de acordo com o valor do grau de sobreconsolidação (adaptado de Matos Fernandes, 2011).	15
Quadro 3.1 - Tendências do comportamento dos solos dos diferentes grupos da classificação unificada quando usados em obras de aterro (adaptado de Lambe e Whitman, 1979).....	20
Quadro 4.1 - Dosagem dos agentes estabilizadores para as 5 soluções distintas.	27
Quadro 4.2 - Plano para a realização dos ensaios UCS.	42
Quadro 4.3 - Plano para a realização dos ensaios edométricos.	42
Quadro 5.1 - Nomenclatura atribuída a todos os ensaios realizados.	43

SIMBOLOGIA

A - Área da secção transversal da amostra	NH_3 - Amoníaco
A_C - Área da secção transversal corrigida da amostra	NH_4^+ - Ião amónio
Au - Ouro	q_u - Resistência à compressão não confinada
C - Concentração	$q_{u50\%}$ - Tensão correspondente a 50% da carga de rotura
C_C - Índice de compressibilidade	u_e - Excesso de pressão neutra
C_R - Índice de recompressibilidade	V - Volume
C_S - Índice de expansibilidade	V_0 - Volume inicial da amostra
Ca^{2+} - Ião cálcio	V_{CO_2} - Volume de dióxido de carbono libertado
CaCl_2 - Cloreto de cálcio	V_S - Volume das partículas sólidas
CaCO_3 - Carbonato de cálcio	V_V - Volume de vazios da amostra
Cl^- - Ião cloro	W - Teor em água
CO_2 - Dióxido de carbono	W_{opt} - Teor de água óptimo
CO_3^{2-} - Ião carbonato	$\%_{\text{CaCO}_3}$ - Teor de CaCO_3
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ - Ureia	ϵ_a - Extensão axial
D - Diâmetro do provete	$\epsilon_{a50\%}$ - Extensão axial correspondente a 50% da carga de rotura
e - Índice de vazios da amostra	ϵ_{vert} - Extensão vertical
e_0 - Índice de vazios inicial da amostra	ϵ_{vol} - Extensão volumétrica
e_f - Índice de vazios final da amostra	γ_d - Peso volúmico seco
E_{u50} - Módulo de deformabilidade para 50% da carga de rotura	σ'_p, σ'_y - Tensão de pré-consolidação ou tensão de cedência
F - Força	σ'_v - Tensão efectiva vertical
G_S - Densidade das partículas sólidas	Δe - Variação do índice de vazios da amostra
h - Altura do provete	ΔH - Variação da altura da amostra
H_0 - Altura inicial da amostra	ΔV - Variação do volume da amostra
H_2O - Água	ΔV_V - Variação do volume de vazios da amostra
HCl - Ácido clorídrico	$\Delta\delta_v$ - Variação do deslocamento vertical
M - Massa molar	
m_{CaCO_3} - Massa de CaCO_3	
$m_{\text{solo intr}}$ - Massa de CaCO_3 introduzida	
m_t - Massa teórica	
n - Quantidade química	

ABREVIATURAS

ASTM - American Society for Testing and Materials

BS - British Standard

DEC-FCTUC - Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra

DEQ-FCTUC - Departamento de Engenharia Química da Universidade de Coimbra

EMCP - Enzyme Mediated Calcite Precipitation

IPN - Instituto Pedro Nunes

NP - Norma Portuguesa

OCR - Grau de sobreconsolidação

ONU - Organização das Nações Unidas

PVC - Policloreto de vinil

SEM - Scanning Electron Microscopes

UCS - Unconfined Compression Strength

XRD - X-Ray Diffraction

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

Devido ao desenvolvimento económico registado no início do século XX e ao aumento exponencial da população mundial surge a necessidade de melhorar os solos existentes de forma a satisfazer os critérios de segurança e estabilidade (Massarsch, 2005). Tal só é possível devido aos progressos e às inovações dos materiais e tecnologias de construções verificadas nas últimas décadas, existindo essencialmente dois grupos de técnicas: as técnicas de reforço dos solos e técnicas de melhoramento (ou técnicas de estabilização). As primeiras consistem no reforço estrutural do solo através da introdução de elementos resistentes capazes de suportar todas as solicitações (estacas, pregagens, ancoragens etc). As segundas são técnicas de estabilização que consistem na alteração de uma ou várias propriedades intrínsecas do solo através de processos de natureza química, física ou mecânica, como por exemplo, a compactação, “o jet-grouting” e o “deep mixing” (Cardoso, 1987).

Devido às alterações climáticas, as técnicas de estabilização de solos além de optimizarem o compromisso técnico-económico, devem também considerar o impacte ambiental. Por exemplo, o uso do cimento Portland, material usado com abundância nas últimas décadas, origina a libertação de CO_2 para a atmosfera contribuindo para o aquecimento global (DeJong et al., 2010). Neste ponto de vista, torna-se necessário dar respostas conscientes e que não comprometam as gerações futuras e, por isso mesmo, as técnicas de bioestabilização podem ser uma escolha interessante neste sentido. A bioestabilização é uma técnica recente que recorre a processos biológicos para melhorar as características dos solos e que nos últimos anos tem sido objecto de estudo por diversos autores, sendo apontada como uma técnica promissora de melhoramento de solos granulares (Van Paassen, 2009; DeJong et al., 2013).

Neste contexto será analisado o método de precipitação do carbonato de cálcio por via enzimática, que consiste na mistura do solo com ureia, cloreto de cálcio e *urease enzyme* (Yasuhara et al., 2012; Neupane et al., 2013). O presente trabalho visa estudar o efeito da variação do tempo de cura e da dosagem dos agentes estabilizadores na deformabilidade e resistência à compressão não confinada do solo bioestabilizado.

1.2 Estrutura da dissertação

O trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação encontra-se dividido em seis capítulos, nomeadamente:

Capítulo 1 - Introdução: enquadramento geral do tema que é objecto de estudo e uma breve descrição da estrutura da tese.

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica: exposição de conceitos, fundamentos e trabalhos/estudos de autores essenciais para o desenvolvimento da dissertação.

Capítulo 3 - Caracterização do solo: caracterização do solo artificialmente criado com base no ensaio granulométrico, nos limites de consistência, na densidade das partículas do solo, no ensaio Proctor e na medição do pH do solo natural.

Capítulo 4 - Procedimento Laboratorial e Plano de Ensaios: descrição das características dos provetes de ensaios, da sua preparação, do equipamento utilizado, da solução estabilizadora e da sua compactação, bem como a descrição detalhada do procedimento laboratorial a realizar: ensaio de compressão simples não confinada (UCS), ensaio edométrico, medição de pH, medição do teor de CaCO_3 , ensaio XRD e o ensaio SEM. Adicionalmente, elaborou-se um plano de ensaios de modo a estudar o comportamento mecânico do solo bioestabilizado.

Capítulo 5 - Apresentação e análise de resultados: apresentação e exposição dos resultados provenientes dos ensaios realizados, bem como a sua discussão e comparação com trabalhos realizados por outros autores.

Capítulo 6 - Conclusões e sugestões para trabalhos futuros: apresentação sucinta das conclusões finais e de propostas para investigações futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biotecnologia e o desenvolvimento sustentável

De acordo com a Convenção sobre Diversidade Biológica da ONU, a Biotecnologia é definida como qualquer aplicação tecnológica que utiliza organismos vivos, sistemas biológicos ou os seus derivados para fabricar/modificar produtos ou processos para uma dada utilização específica.

A Biotecnologia pode desempenhar um papel importante na área do desenvolvimento sustentável promovendo, por exemplo, a eficiência energética e a redução de matérias-primas (Torgal et al., 2015). O desenvolvimento sustentável é aquele que “permite satisfazer as necessidades do presente sem comprometer as possibilidades das gerações futuras satisfazerem as suas” (Relatório Bruntland, 1987). A Figura 2.1 apresenta a evolução do número de artigos em revistas científicas com a expressão *desenvolvimento sustentável* ao longo dos anos de 1988 a 2010, referenciados na base de dados Scopus-Elsevier.

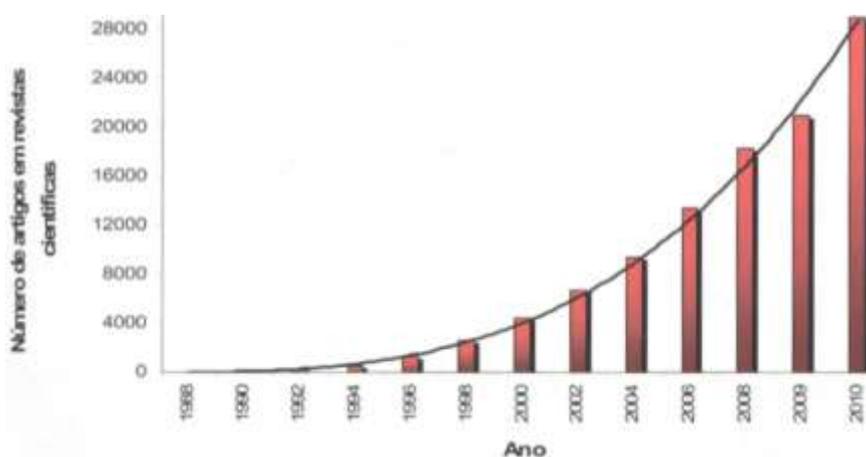


Figura 2.1 - Evolução do número de artigos em revistas científicas com a expressão desenvolvimento sustentável nos anos 1988-2010 (Torgal e Jalali, 2010).

Ora, constata-se que o desenvolvimento sustentável tem sido alvo de estudo por parte da comunidade científica com um crescimento exponencial nos anos 1988-2010 e, neste âmbito, a Biotecnologia pode contribuir e desempenhar um papel interessante.

2.2 Biocologia aplicada. Bioestabilização

A Biocologia pode ter diversas aplicações no âmbito da Engenharia Civil, como por exemplo: a construção de edifícios verdes para controlar a temperatura, melhorar a qualidade do ar e reduzir o nível de ruído através da vegetação como revestimentos das fachadas; o tratamento das águas residuais e a bioestabilização de solos através do uso de bactérias ou enzimas de forma a melhorar as propriedades do solo, entre outras (Torgal et al., 2015).

A Bioestabilização consiste no melhoramento das propriedades do solo através da precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3), assumindo em geral a forma de cristais de calcite. A precipitação de CaCO_3 pode ser obtida através da degradação da ureia promovida pela acção catalisadora da enzima *urease*, a qual pode ser produzida *in situ* por bactérias ou introduzida directamente no solo (Nemati et al., 2003). Ora, é precisamente a precipitação do carbonato de cálcio por via enzimática, consistindo na mistura do solo com ureia, cloreto de cálcio e *urease enzyme* ao invés do processo do cultivo de bactérias o qual é moroso, complicado e muito sensível (Yasuhara et al., 2012; Neupane et al., 2013) que será objecto de estudo desta dissertação.

Nos últimos anos, inclusivé no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, realizaram-se vários trabalhos na área da bioestabilização e estabilização química de solos. Venda Oliveira et al. (2016) concluíram que à excepção do solo mole, todos os solos analisados (areia branca, areia, areia siltosa e silte arenoso) beneficiaram com o processo de estabilização através da precipitação do carbonato de cálcio por via enzimática aumentando a resistência não confinada e o módulo de deformabilidade (Figuras 2.2 e 2.3).

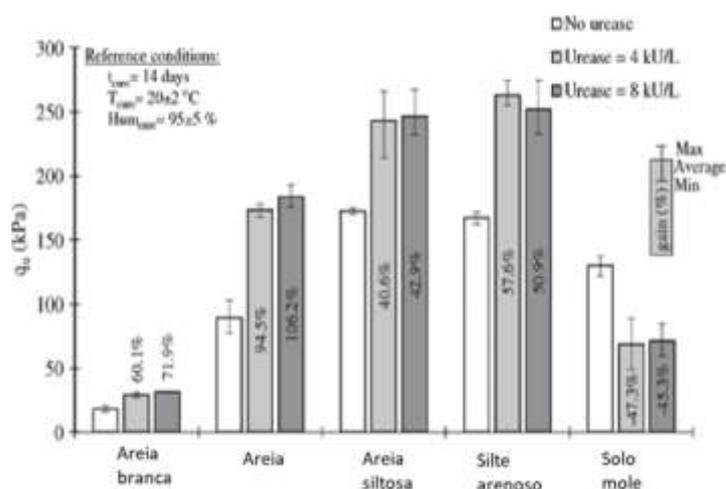


Figura 2.2 - Testes UCS; efeito do tipo de solo e da concentração da enzima *urease* na resistência à compressão não confinada (adaptado de Venda Oliveira et al., 2016).

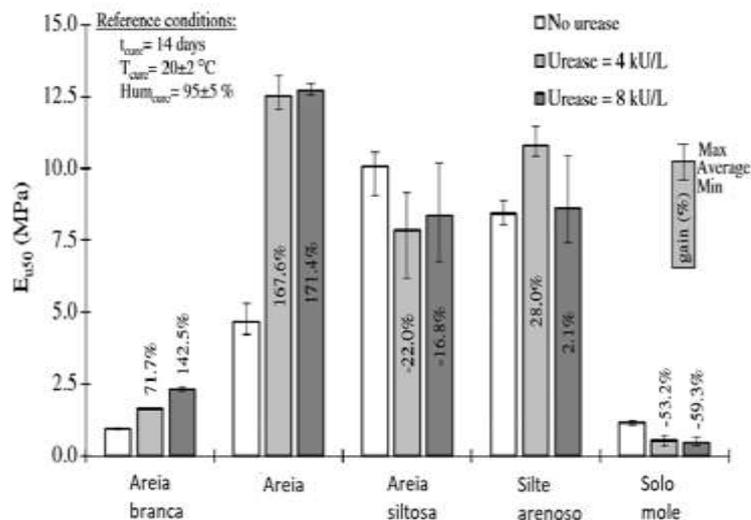


Figura 2.3 - Testes UCS; efeito do tipo de solo e da concentração da enzima *urease* no módulo de deformabilidade (adaptado de Venda Oliveira et al., 2016).

Carmona et al. (2018), tendo como base um saibro (areia mal graduada com silte e cascalho), concluíram que o efeito da bioestabilização induz um ganho na resistência à compressão não confinada (q_u) e no módulo de deformabilidade (E_{u50}), mais acentuado nos primeiros 7 dias, tendo posteriormente um crescimento mais reduzido com a evolução do tempo de cura (Figura 2.4).

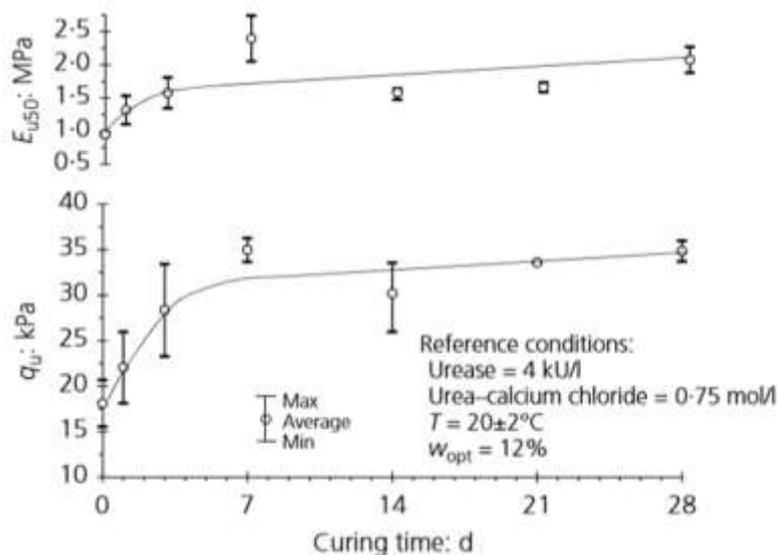
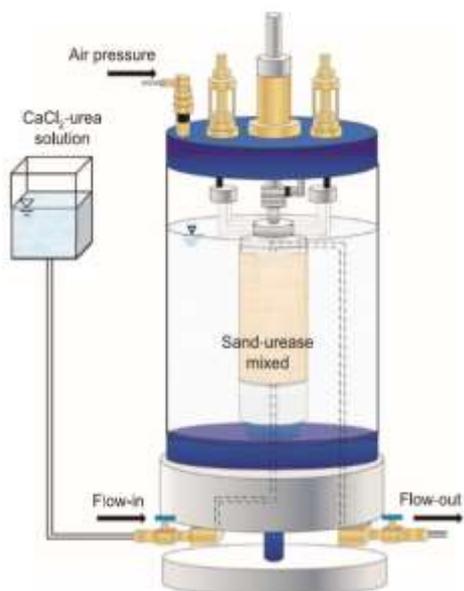


Figura 2.4 - Testes UCS; variação do q_u e do E_{u50} com o aumento do tempo de cura (Carmona et al., 2018).

Yasuhara et al. (2012) publicaram resultados experimentais sobre uma areia de Toyoura bioestabilizada, através da precipitação de carbonato de cálcio por via enzimática. Previamente, o provete de solo misturado com a *urease* em pó foi colocado numa célula

triaxial com uma pressão de confinamento de 50 kPa e, de seguida, procedeu-se à injeção da solução equimolar de ureia-cloreto de cálcio. O processo de bioestabilização e os 3 casos de estudo estão apresentados na Figura 2.5.



Casos	Provetes	Ureia- CaCl_2 **	Nº de injeções	Urease*
C1	bio-1,4,6	0.5	8	1
C2	bio-2,5	1	4	1
C3	bio-3,7	0.5	8	0.5

*Quantidade de *urease* misturada com 300 g de solo (g)

**Concentração de ureia-cloreto de cálcio (mol/L)

a)

b)

Figura 2.5 - Areia de Toyoura bioestabilizada: a) Esquema de preparação; b) Condições experimentais para a realização de testes UCS (adaptado de Yasuhara et al., 2012).

A Figura 2.6 apresenta a relação entre a resistência à compressão uniaxial e o precipitado de carbonato de cálcio, sendo que as linhas a tracejado representam o volume de poros ocupado por calcite (Yasuhara et al. (2012)). De acordo com a mesma, uma maior concentração de *urease* e uma maior concentração de ureia-cloreto de cálcio (bio-2, bio-5 e bio-6) promove uma maior resistência do solo bioestabilizado.

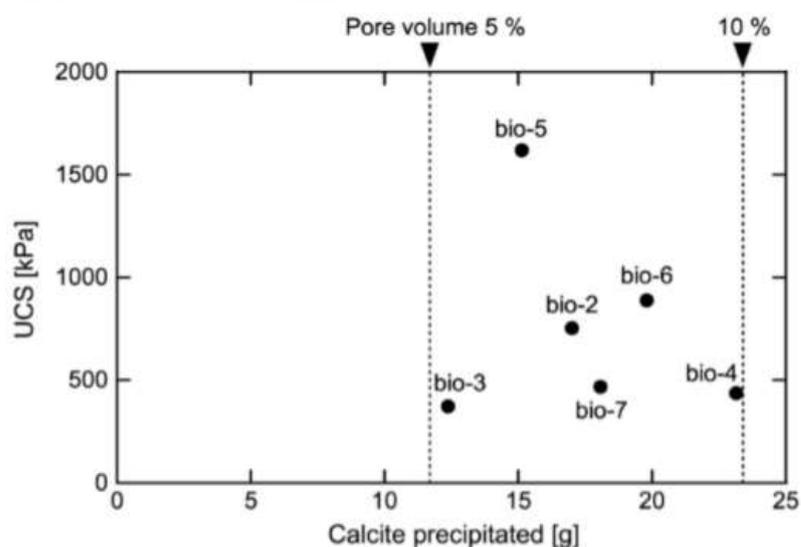


Figura 2.6 - Relação entre a resistência e o precipitado de carbonato de cálcio para os provetes bioestabilizados (Yasuhara et al., 2012).

Yasuhara et al. (2012) submeteram ainda uma amostra de solo bioestabilizada (bio-1) a ensaios SEM (Scanning Electron Microscopes) e XRD (X-Ray Diffraction). Os resultados presentes na Figura 2.7 corroboram a presença de calcite resultante do processo de bioestabilização.

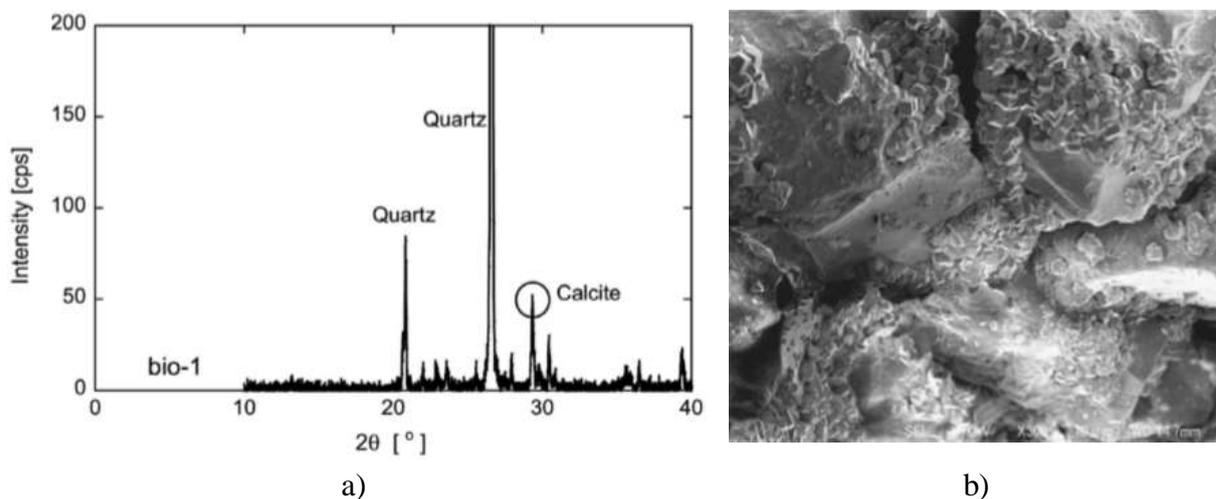


Figura 2.7 - Amostra de solo bioestabilizado (bio-1): a) Ensaio XRD; b) Ensaio SEM (Yasuhara et al., 2012).

Venda Oliveira et al. (2013) mostraram que a estabilização química (usando como ligante cimento Portland) sobre um solo mole do Baixo Mondego melhorou a resposta do solo em termos da consolidação secundária, bem como, o aumento da tensão efectiva de cedência do solo estabilizado e a diminuição do índice de recompressibilidade (C_R). Verificou-se ainda que o índice de compressibilidade (C_C) aumentou no solo estabilizado relativamente ao solo não estabilizado, como sugere a Figura 2.8.

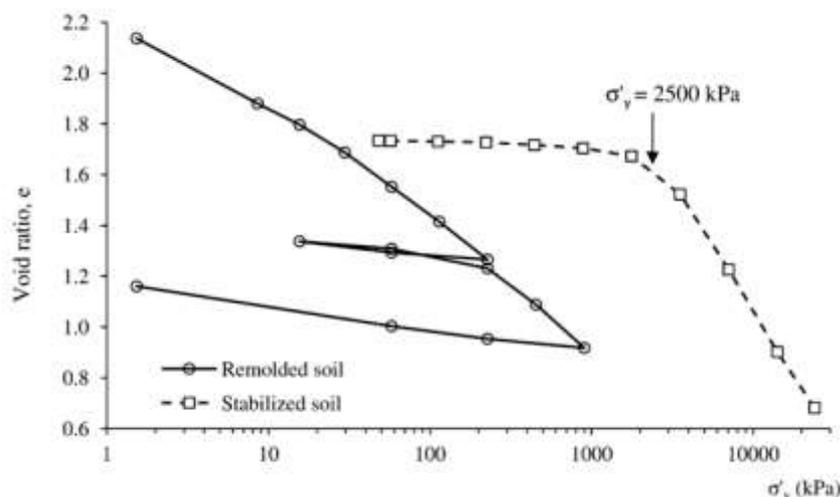


Figura 2.8 - Ensaio edométrico sobre um solo mole estabilizado e não estabilizado (Venda Oliveira et al., 2013).

2.3 Precipitação do carbonato de cálcio por via enzimática

A precipitação é um tipo de reacção que ocorre em soluções aquosas e é caracterizada pela formação de um produto insolúvel ou precipitado, ou seja, um sólido insolúvel que se separa da solução (Chang, 2005).

A precipitação do carbonato de cálcio por via enzimática envolve uma solução aquosa de cloreto de cálcio, ureia e *urease* enzyme, como ilustra a Figura 2.9 (Yasuhara et al., 2012).

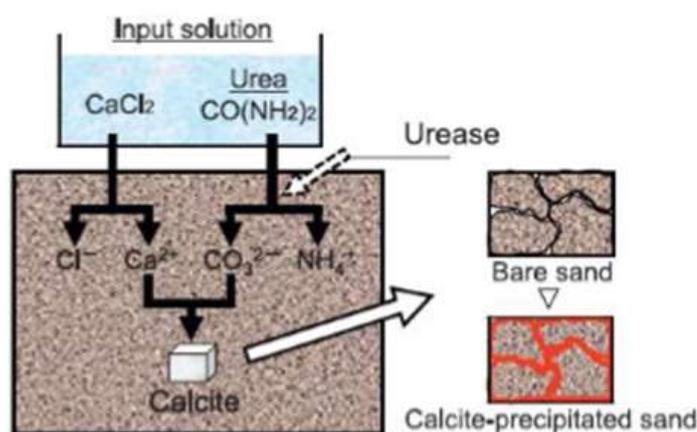
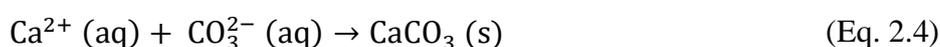
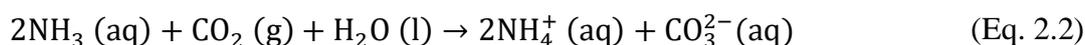
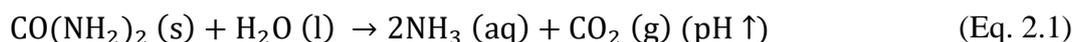


Figura 2.9 - Esquema do processo de precipitação do carbonato de cálcio por via enzimática (Yasuhara et al., 2012).

A EMCP (Enzyme Mediated Calcite Precipitation) é governada por um conjunto de equações químicas que será descrito de seguida. A enzima *urease* promove a catalização da hidrólise da ureia ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), originando amoníaco (NH_3) e dióxido de carbono (CO_2), levando ao aumento do pH da solução (Eq. 2.1). O amoníaco e o dióxido de carbono reagem com a água e originam como produtos de solução iões amónio (NH_4^+) e iões carbonato (CO_3^{2-}) (Eq. 2.2). A solução aquosa de cloreto de cálcio (CaCl_2) fornece os iões cálcio (Ca^+) e os iões cloreto (Cl^-) (Eq. 2.3). Por fim, os iões cálcio e os iões carbonato na presença um do outro produzem, espontaneamente, carbonato de cálcio (CaCO_3) (Eq. 2.4) (Chou et al., 2011; Burbank et al., 2013).



O precipitado formado (CaCO_3) pode apresentar três formas de cristais: calcite, aragonite e vaterite. A Figura 2.10 é uma imagem microscópica que ilustra a presença de calcite produzida por via bacteriana num solo arenoso (Al-Thawadi, 2011).

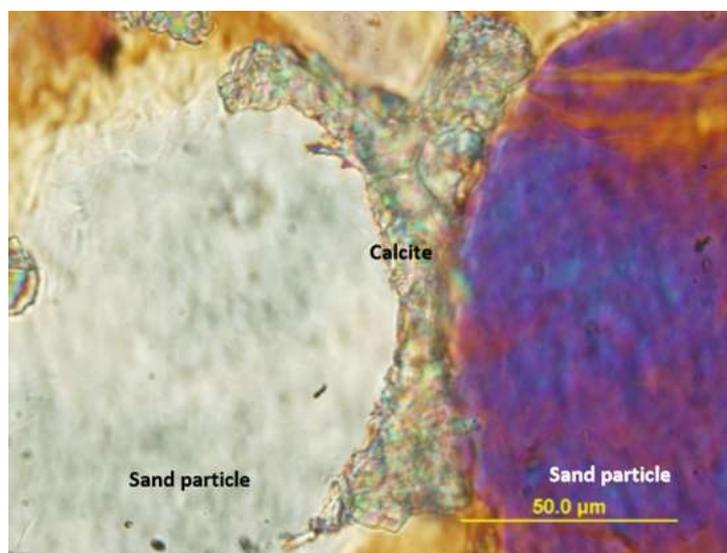


Figura 2.10 - Imagem microscópica de cristais calcite entre duas partículas de areia (Al-Thawadi, 2011).

Carmona et al. (2018) mostraram que uma maior quantidade de *urease* aumenta a eficiência da reacção pois aumenta a quantidade de ureia degradada e, conseqüentemente, uma maior massa de carbonato de cálcio precipitada. Os resultados sugerem ainda que existe uma concentração óptima de ureia-cloreto de cálcio que maximiza a massa de precipitado (Figura 2.11).

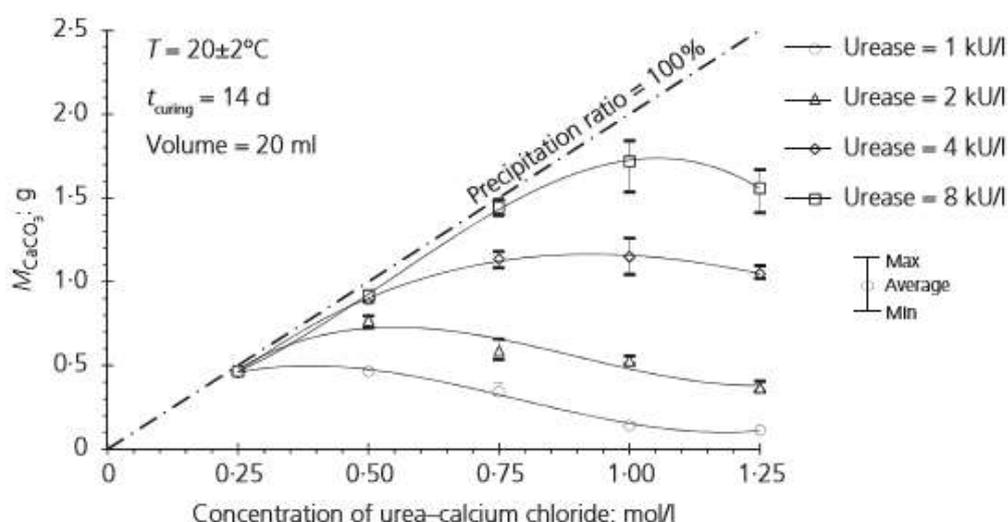


Figura 2.11 - Massa de CaCO_3 em função das concentrações ureia-cloreto de cálcio e de *urease* (Carmona et al., 2018).

2.4 Grandezas básicas do solo

Para além de compreender o processo de bioestabilização, é importante entender todas as grandezas necessárias para descrever o estado físico dos solos, sendo que, parte delas, são caracterizadas no capítulo 3 e abordadas ao longo do presente trabalho.

Os três volumes (V_s , V_w , V_a) e os três pesos (W_s , W_w , W_a) dizem respeito ao volume e à massa das partículas sólidas, da água e do ar, respectivamente e permitem definir completamente o estado físico do solo. Como o peso da fase gasosa (W_a) pode ser desprezado, o quociente do peso de água (W_w) e do volume de água (V_w) é constante e igual a $9,81 \text{ kN/m}^3$ e, por fim, o volume (ou o peso) da amostra é obviamente arbitrário, as seis grandezas reduzem-se a três. Por isso mesmo, na prática, determinam-se experimentalmente as três seguintes grandezas: o teor em água, o peso volúmico e o peso das partículas sólidas (Matos Fernandes, 2011).

A Figura 2.12 apresenta a disposição física do solo, os símbolos, as definições, as unidades e as observações associadas a todas as grandezas básicas que permitem definir o estado físico do solo.

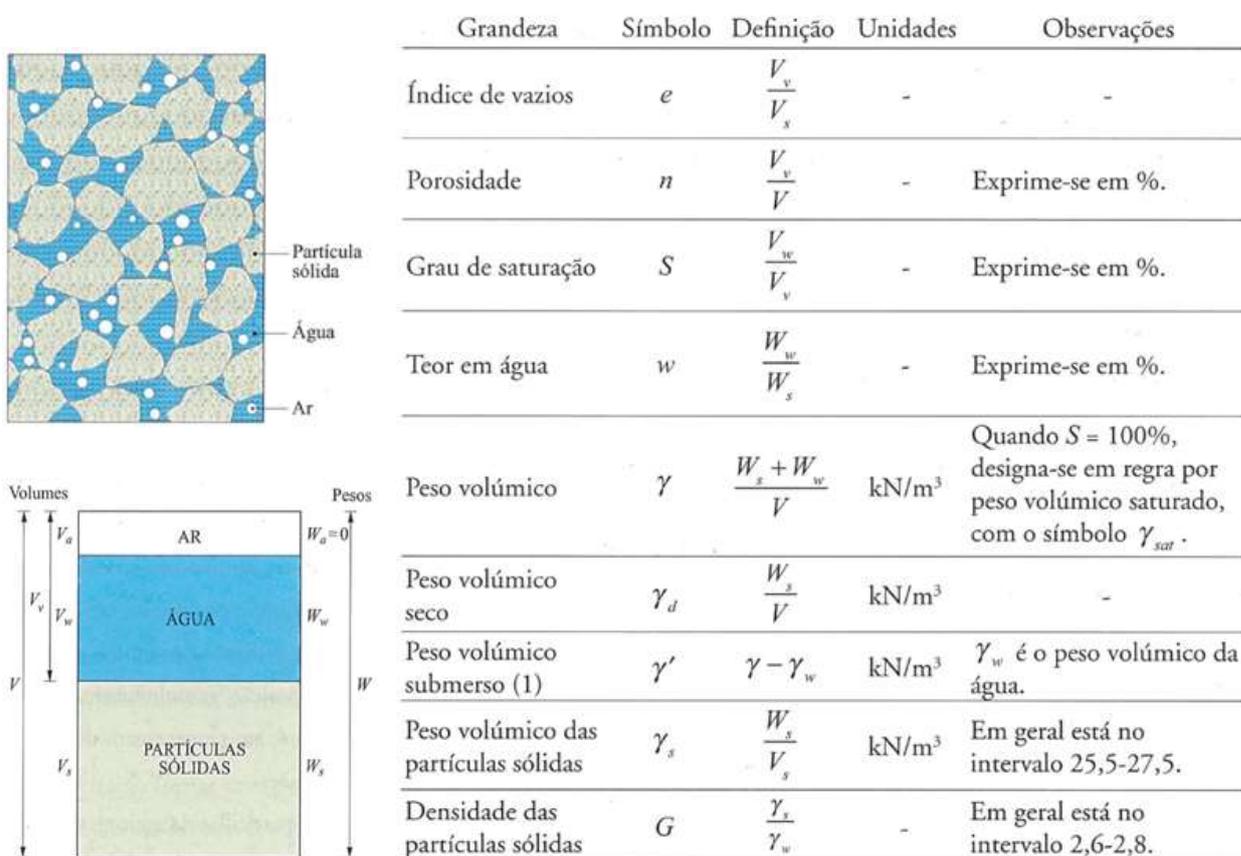


Figura 2.12 - Grandezas básicas do solo (adaptado de Matos Fernandes, 2011).

2.5 Compressibilidade e consolidação dos solos

Os solos, nomeadamente os solos argilosos saturados, experimentam uma variação de volume quando sujeitos a solicitações que se traduzem em assentamentos de superfície que se podem prolongar por períodos de tempo muito dilatados (Matos Fernandes, 2011).

O mecanismo da consolidação pode ser ilustrado através da formulação da Teoria da Consolidação Unidimensional proposta por Karl Terzaghi em 1936, que se baseia num reservatório de paredes rígidas cheio de água, com um êmbolo em forma de disco no qual existe um orifício muito estreito e uma mola que liga o disco à base do reservatório, como ilustra a Figura 2.13.

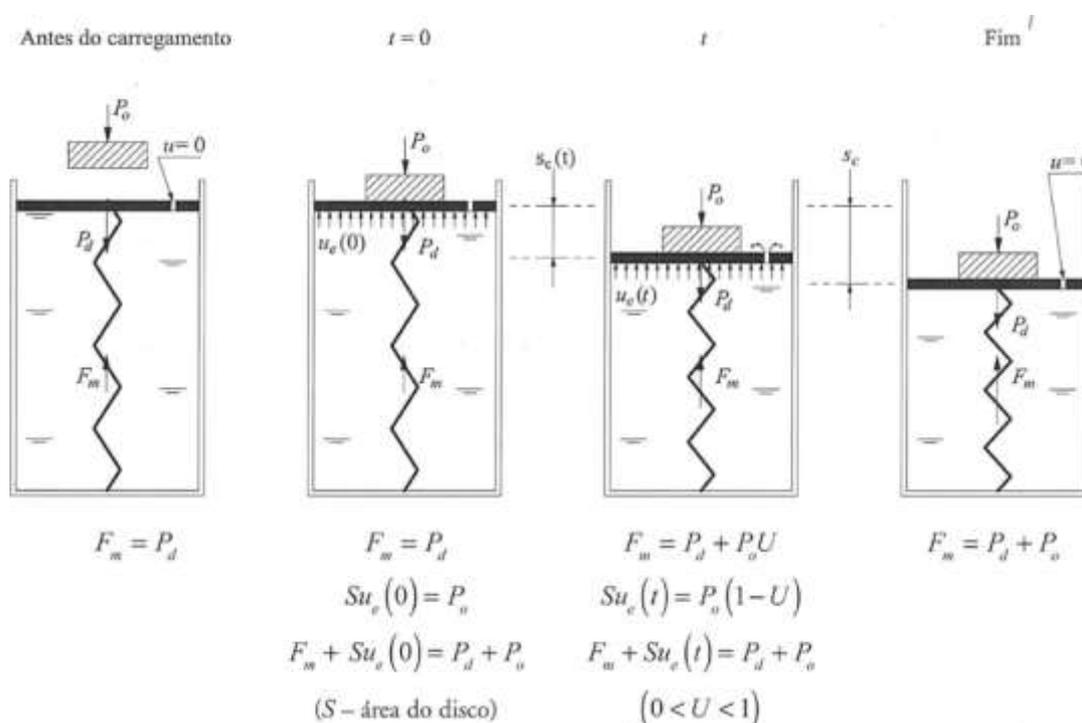


Figura 2.13 - Analogia de Terzaghi para os fenómenos do carregamento e da consolidação de estratos confinados de argila (Matos Fernandes, 2011).

Na situação inicial, o peso do disco é suportado exclusivamente pela força da mola. No instante inicial, quando o objecto é bruscamente pousado sobre o disco, a força da mola não varia pois o seu comprimento ainda não se alterou pelo que, nesse instante, o peso do objecto é suportado por uma sobrepressão (u_e) que desenvolve uma força dada pelo produto da pressão da água nos poros e pela área do disco. Ao longo do tempo, a água vai sendo expulsa pelo orifício, permitindo a descida do disco e o encurtamento da mola e, conseqüentemente, o crescimento da força mobilizada por esta. Por fim, toda a água é expulsa e toma o valor da pressão atmosférica, atingindo-se um novo estado de equilíbrio, onde o peso do disco e o peso do objecto é suportado pela força da mola (Matos Fernandes, 2011). À formulação da Teoria

da Consolidação Unidimensional de Terzaghi, pode-se fazer uma analogia a um carregamento de um estrato de solo confinado, como ilustra a Figura 2.14.

	Modelo de Terzaghi	Carregamento de um estrato confinado
Componentes	Mola	Esqueleto sólido do solo
	Água	Água dos poros do solo
	Disco	Estratos sobrejacentes ao estrato de argila
	Objecto	Obra construída à superfície do terreno
	Dimensões do orifício	Permeabilidade da argila
Tensões ou forças	Força na mola, F_m	Tensão efectiva
	Pressão na água, u	Pressão nos poros / pressão neutra
	Sobrepessão na água, u_e	Excesso de pressão neutra
	Peso do disco, P_d	Tensão efectiva de repouso
	Peso do objecto, P_o	Sobrecarga aplicada à superfície
Deslocamentos	Altura que o disco desceu até ao instante t , $s_c(t)$	Assentamento por consolidação no instante t
	Altura que o disco desceu no final do processo, s_c	Assentamento por consolidação (final)

Figura 2.14 - Correspondência entre o modelo de Terzaghi e o carregamento de um estrato confinado (Matos Fernandes, 2011).

A dissipação do excesso de pressão neutra ao longo do tempo, com transferência progressiva do incremento de tensão total da fase líquida para a fase sólida do solo, designa-se consolidação (Matos Fernandes, 2011). A compressibilidade do solo é entendida como a deformação volumétrica positiva, de compressão, que o solo experimenta quando solicitado, associado à redução de volume devida à variação crescente do valor do nível de tensão efectiva. A velocidade com que se processa a dissipação do excesso de pressão neutra gerada devido à solicitação depende, essencialmente, da permeabilidade, da espessura do estrato e das condições de drenagem nas fronteiras do estrato do solo (Matos Fernandes, 2011). Na Figura 2.15 pode-se observar as condições do maciço e a evolução do estado de tensão num ponto genérico da camada de argila quando carregado.

Os edómetros são sistemas de compressão que permitem medir a variação dos assentamentos ao longo do tempo, devido à variação de volume experimentada pelo solo. A deformação lateral do solo é desprezável devido à rigidez do anel e a área transversal da amostra de solo permanece constante durante o carregamento, pelo que a deformação volumétrica experimentada pelo solo, é dada pelo quociente da variação da altura da amostra em relação à altura da amostra inicial (Eq. 2.5). Este tipo de ensaios permite então determinar a deformação da amostra de solo quando solicitado em função da variação do índice de vazios (Eq. 2.6).

$$\varepsilon_{\text{vol}} = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{A \times \Delta H}{A \times H_0} = \frac{\Delta H}{H_0} = \varepsilon_{\text{vert}} = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

$$e = \frac{V_V}{V_S} \text{ ou seja } \Delta e = \frac{\Delta V_V}{V_0} = \frac{\Delta V}{V_0} \times (1 + e_0) = \frac{\Delta H}{H_0} \times (1 + e_0) \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Onde:

ε_{vol} - Extensão volumétrica

ΔV - Variação do volume da amostra

A - Área da secção transversal da amostra

ΔH - Variação da altura da amostra

H_0 - Altura inicial da amostra

$\varepsilon_{\text{vert}}$ - Extensão vertical

e - Índice de vazios da amostra

V_V - Volume de vazios da amostra

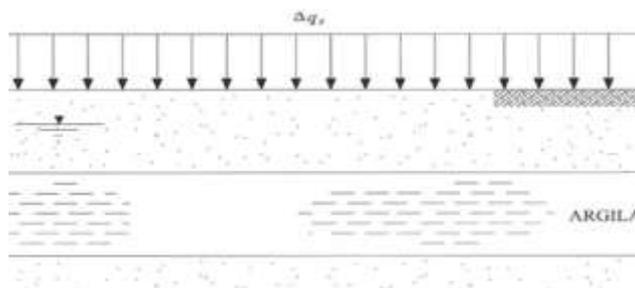
V_S - Volume das partículas sólidas

Δe - Variação do índice de vazios da amostra

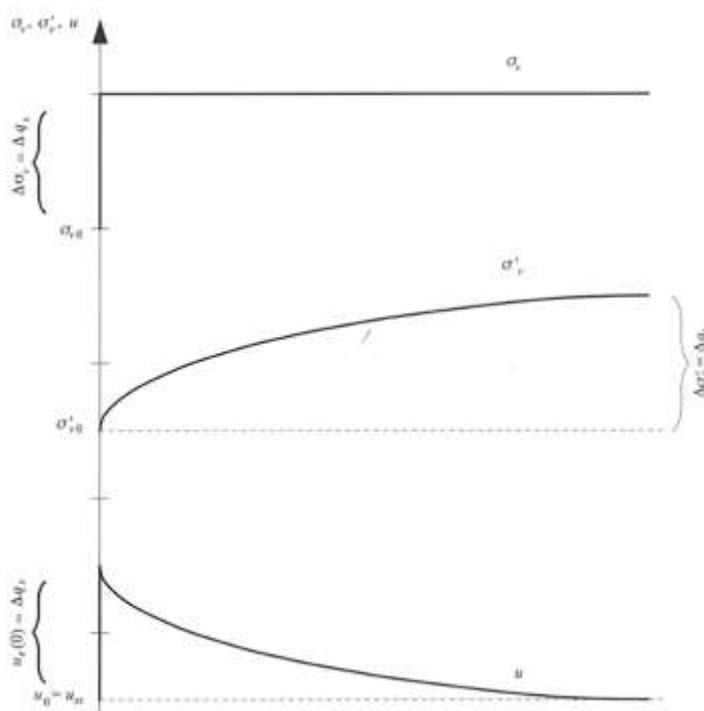
ΔV_V - Variação do volume de vazios da amostra

V_0 - Volume inicial da amostra

e_0 - Índice de vazios inicial da amostra



a)



b)

Figura 2.15 - Carregamento de um estrato confinado de argila (Matos Fernandes, 2011): a) Condições do maciço e do carregamento; b) Evolução com o tempo de estado de tensão num ponto genérico do estrato de argila.

2.6 Parâmetros de compressibilidade dos solos

O ensaio edométrico permite obter a curva de compressibilidade do solo relacionando o índice de vazios com a tensão efectiva vertical, como referido na secção 2.5, relação essa que pode ser expressa em escala aritmética ou em escala logarítmica, como se ilustra na Figura 2.16.

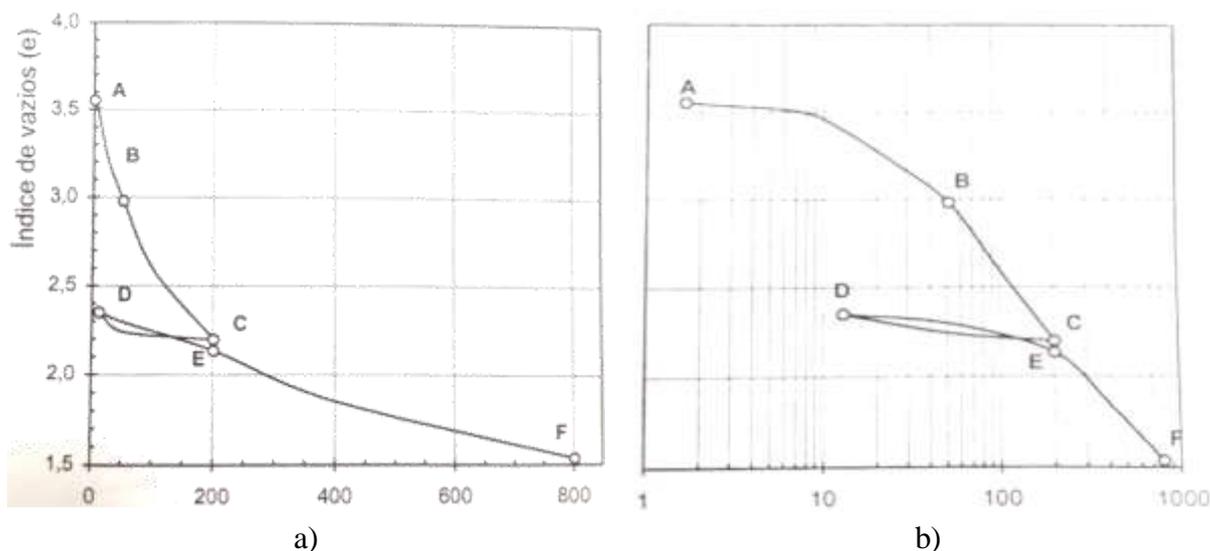


Figura 2.16 - Diagramas da tensão efectiva vertical vs índice de vazios de uma amostra de argila do Baixo Mondego, submetida a um ensaio edométrico (Coelho, 2000): a) Tensão efectiva vertical em escala aritmética; b) Tensão efectiva vertical em escala logarítmica.

A partir do curva edométrica expressa numa escala logarítmica (Figura 2.13 b)), é possível definir alguns parâmetros de compressibilidade característicos do solo, isto é, independentes do valor da tensão efectiva, nomeadamente, o índice de compressibilidade (C_C), o índice de recompressibilidade (C_R) e o índice de expansibilidade (C_S).

O índice de compressibilidade é definido como o declive (em módulo) do ramo virgem da curva $\log \sigma'_v - e$, através da seguinte expressão:

$$C_C = \left| -\frac{\Delta e}{\Delta \log(\sigma'_v)} \right| = \left| -\frac{e_f - e_i}{\log\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vi}}\right)} \right| \quad (\text{Eq. 2.7})$$

O índice de recompressibilidade/expansibilidade representa o declive (em módulo) dos ramos de recarga ou descarga da curva $\log \sigma'_v - e$, através da seguinte expressão:

$$C_R \approx C_S = \left| -\frac{\Delta e}{\Delta \log(\sigma'_v)} \right| = \left| -\frac{e_f - e_i}{\log\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vi}}\right)} \right| \quad (\text{Eq. 2.8})$$

Para além dos parâmetros anteriormente mencionados e definidos, o diagrama $\log \sigma'_v - e$ permite ainda identificar a tensão de pré-consolidação, que é a máxima tensão efectiva vertical experimentada pelo solo e que corresponde ao ponto onde se observa uma alteração do comportamento do mesmo quando solicitado, isto é, para tensões inferiores à respectiva tensão de pré-consolidação (σ'_p), o solo apresenta uma baixa compressibilidade (devido à sua memória a estrutura do solo foi como que preparada para resistir a tais solicitações) e para tensões superiores à respectiva tensão de pré-consolidação, ou seja, tensões que o solo nunca teve submetido ao longo da sua história geológica, o solo apresenta elevada compressibilidade (Matos Fernandes, 2011).

O grau de sobreconsolidação do solo (OCR) é definido pelo quociente entre a tensão de pré-consolidação e a tensão efectiva vertical actual do solo (Eq. 2.9). O Quadro 2.1 permite observar o grau de consolidação dos solos em função do valor do OCR.

$$\text{OCR} = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Quadro 2.1 - Classificação dos solos de acordo com o valor do grau de sobreconsolidação (adaptado de Matos Fernandes, 2011).

Classificação	OCR
Normalmente consolidado	≈ 1
Ligeiramente sobreconsolidado	1 a 2
Medianamente sobreconsolidado	2 a 5
Fortemente sobreconsolidado	> 5

2.7 Aplicação do método de Casagrande

A tensão vertical de pré-consolidação (σ'_p) pode ser determinada por vários métodos, nomeadamente, o método de Casagrande, o método de Schmertmann, o método de Butterfield, entre outros.

Para o desenvolvimento do presente trabalho, optou-se pela determinação da tensão de pré-consolidação através do método de Casagrande, que consiste na aplicação dos seguintes passos (Matos Fernandes, 2011):

- 1) Localizar, na curva $\log \sigma'_v - e$, o ponto de menor raio de curvatura (Ponto O).
- 2) Pelo Ponto O, traçar uma linha horizontal e outra tangente à curva (do lado do ramo virgem).
- 3) Traçar a bissetriz do ângulo formado pelas duas rectas anteriores.
- 4) Prolongar a recta tangente ao ramo virgem até intersectar a bissetriz (Ponto E).
- 5) A abcissa do ponto E corresponde à tensão de pré-consolidação.

A Figura 2.17 ilustra a construção do método de Casagrande, respeitando os passos anteriores, a fim de determinar a tensão de pré-consolidação.

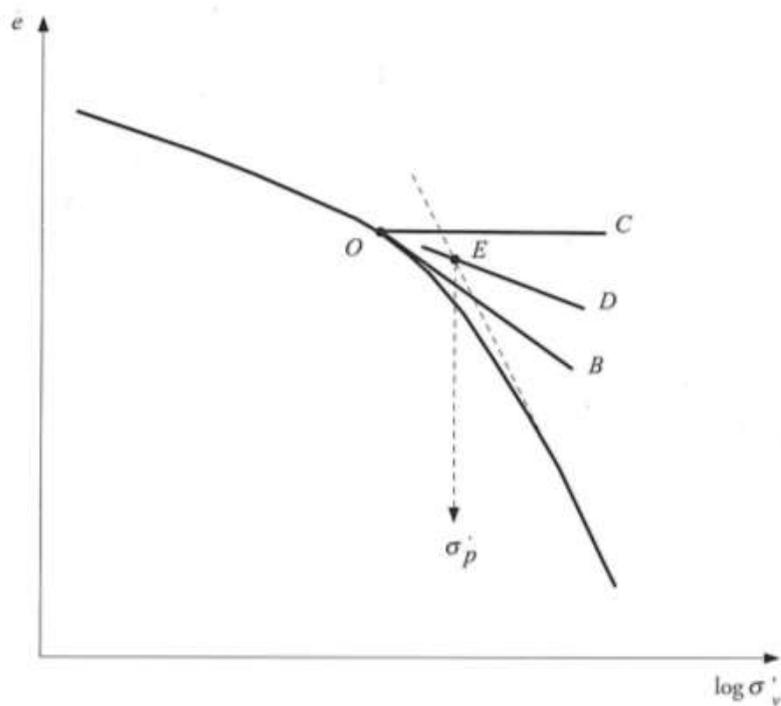


Figura 2.17 - Aplicação do método de Casagrande para a determinação da tensão de pré-consolidação (Matos Fernandes, 2011).

3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

3.1 Introdução

Este capítulo visa caracterizar o solo em estudo que foi artificialmente criado em Laboratório e é constituído, em massa, por 75% saibro e por 25% argila, denominado por S75/A25.

A caracterização geotécnica do solo em estudo consiste na avaliação da composição granulométrica, dos limites de consistência, da densidade das partículas, do teor em água óptimo resultante do ensaio Proctor Leve e do valor do pH do solo natural.

Importa ainda referir que todo o trabalho de caracterização do solo foi realizado, em conjunto, com o colega Diogo José Rebelo Cabral no âmbito da tese intitulada “*Biotechnologia em solos. Impacte ambiental do precipitado de CaCO_3 por via enzimática.*”

3.2 Granulometria do solo

A composição granulométrica do solo permite conhecer, em termos qualitativos, a distribuição das dimensões das partículas do solo. Para tal, recorreu-se à especificação E 196-1966 do LNEC que descreve todos os passos a seguir para determinar a composição granulométrica de um solo, descrevendo dois processos distintos de acordo com as dimensões das partículas, a peneiração e a sedimentação.

Tratamento da fracção grossa – Peneiração

A especificação E 196-1966 descreve o processo da peneiração para o tratamento da fracção grossa, isto é, para as partículas superiores a 0,075 mm (#200). Este processo é manual e consiste em passar uma certa quantidade de solo num conjunto de peneiros padronizados, de malha quadrada sucessivamente mais apertada, através de movimentos de rotação e translação, alternando o sentido várias vezes com o objectivo de calcular a percentagem de solo retido em cada peneiro. Sabendo as percentagens de massa de solo retido em cada peneiro, estamos em condições de traçar a curva granulométrica referente à fracção grossa do solo S75/A25 (Quadro A.1).

Tratamento da fracção fina – Sedimentação

A especificação E 196-1966 descreve o processo de sedimentação para o tratamento da fracção fina, isto é, para as partículas inferiores a 0,075 mm (#200). Este processo consiste em avaliar o diâmetro das partículas através das suas velocidades de sedimentação, segundo a Lei de Stokes (Quadro A.2). Conhecendo a curva granulométrica da fracção fina do solo e conhecendo previamente a curva granulométrica da fracção grossa, pode-se traçar a curva granulométrica do solo S75/A25, como ilustra a Figura 3.1. De acordo com a mesma, o solo em estudo é constituído, em massa, por 77,4% de areia, 16,1% de silte e 6,5% de argila.

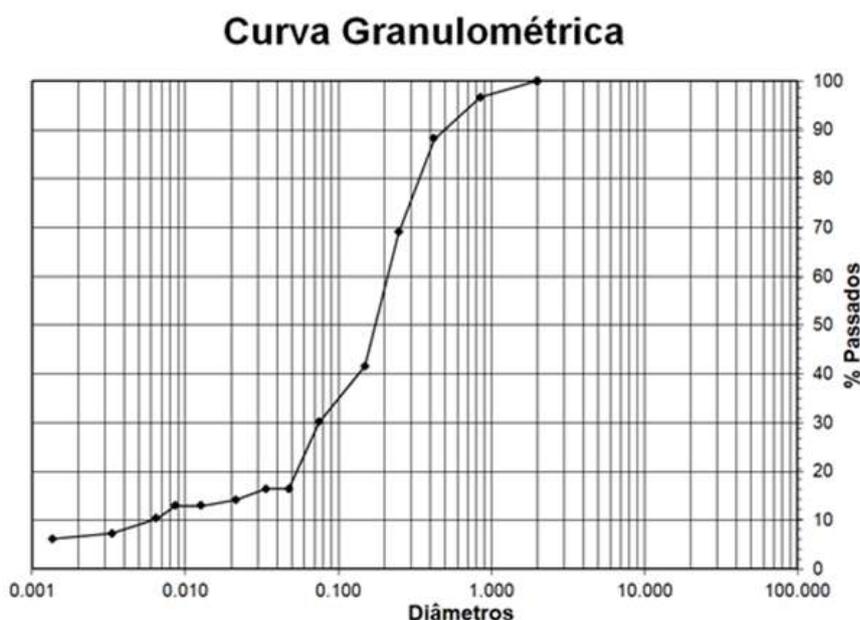


Figura 3.1 - Curva granulométrica para o solo em estudo.

3.3 Limites de consistência ou de Atterberg

Os limites de consistência do solo em estudo podem ser determinados segundo a norma NP 143 (1969). Para o solo S75/A25, os limites de consistência não podem ser determinados pois de acordo com a Norma supracitada, o solo em estudo “não tem cerca de 30%, ou mais, em massa, de partículas de dimensões inferiores a 0,05 mm”.

3.4 Densidade das partículas do solo

A Norma NP-83 (1965) descreve o processo experimental a fim de determinar a densidade das partículas do solo (G), que expressa o quociente do peso volúmico das partículas do solo e do peso volúmico da água destilada a 20 °C. No Quadro A.3 estão apresentados os valores registados ao longo do ensaio de acordo com a Norma anteriormente citada com o objectivo de determinar a densidade das partículas do solo. Esta grandeza toma o valor de 2,65 para o

solo S75/A25, encontrando-se na gama de valores 2,6-2,8 mencionados por Lambe e Whitman (1979).

3.5 Ensaio Proctor Normal

A especificação E 197-1996 do LNEC descreve o ensaio de Proctor que permite conhecer a relação entre o peso volúmico seco do solo (γ_d) e o teor em água (W). No presente trabalho e respeitando a especificação anteriormente citada, realizou-se a compactação num molde pequeno com um pilão de compactação leve (Ensaio Proctor Leve). Para tal, determinou-se o peso volúmico e o teor de humidade sobre 6 provetes de modo a encontrar o ponto que corresponde à compactação mais eficaz. Os valores dos teores foram obtidos respeitando o procedimento descrito na norma NP-84 de 1965 (método da secagem em estufa a 105 °C até massa constante). De acordo com a Figura 3.2, o peso volúmico seco máximo apresenta um valor de 19,3 kN/m^3 e o valor do teor de água óptimo é de 9,5%.

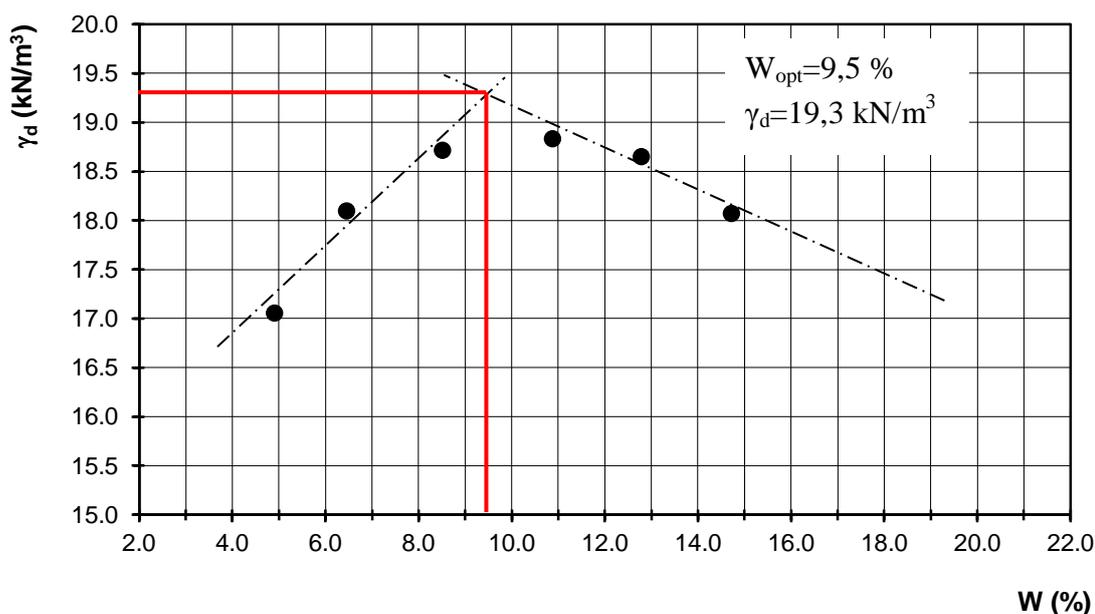


Figura 3.2 - Ensaio do Proctor Normal (Leve).

3.6 Medição do pH

Para a determinação do pH do solo em estudo sem estabilização recorreu-se à norma BS 1377-3 de 1990 da British Standard. Respeitando a norma supracitada, utilizou-se um aparelho com uma precisão mínima de 0,01 e as suspensões do solo, tanto para a calibração como para medição, foram armazenadas e medidas a uma temperatura entre os 18 °C e os 19 °C. Após todos os procedimentos executados, o valor do pH do solo em estudo sem estabilização tem o valor de 7,95 (solo alcalino), medido à temperatura de 18,5 °C.

3.7 Classificação do solo

3.7.1 Classificação unificada dos solos

Segundo a norma ASTM D 2487 (1998) pode classificar-se o solo em estudo e, consoante o seu grupo, prever o seu comportamento. Ora, como detalhado na secção 3.2, trata-se de um solo com 50%, ou mais, da fracção grossa passada no peneiro nº 4 e com mais de 12% de finos e, por isso mesmo, segundo a norma anteriormente mencionada, atribui-se ao solo S75/A25 o nome de Areia Siltosa e ao símbolo do grupo SM. De acordo com o Quadro 3.1, o solo em estudo é semipermeável a impermeável quando compactado, apresenta uma boa resistência ao corte e uma baixa compressibilidade quando compactado e saturado e uma razoável trabalhabilidade como material de construção (Lambe e Whitman, 1979).

Quadro 3.1 - Tendências do comportamento dos solos dos diferentes grupos da classificação unificada quando usados em obras de aterro (adaptado de Lambe e Whitman, 1979).

Símbolo do grupo	Propriedades importantes			
	Permeabilidade quando compactado	Resistência ao corte*	Compressibilidade*	Trabalhabilidade como material de construção
GW	Permeável	Excelente	Desprezável	Excelente
GP	Muito permeável	Boa	Desprezável	Boa
GM	Semipermeável a impermeável	Boa	Desprezável	Boa
GC	Impermeável	Boa a razoável	Muito baixa	Boa
SW	Permeável	Excelente	Desprezável	Excelente
SP	Permeável	Boa	Muito baixa	Razoável
SM	Semipermeável a impermeável	Boa	Baixa	Razoável
SC	Impermeável	Boa a razoável	Baixa	Boa
ML	Semipermeável a impermeável	Razoável	Média	Razoável
CL	Impermeável	Razoável	Média	Boa a razoável
OL	Semipermeável a impermeável	Fraca	Média	Razoável
MH	Semipermeável a impermeável	Razoável a fraca	Alta	Fraca
CH	Impermeável	Fraca	Alta	Fraca
OH	Impermeável	Fraca	Alta	Fraca

*quando compactado e saturado

3.7.2 Triângulo de Feret

Utilizando ainda a informação apresentada na secção 3.2, pode classificar-se o tipo de solo em estudo através do triângulo de Feret, como ilustra a Figura 3.3. Verifica-se então, de acordo com a mesma, que o solo S75/A25 é um solo do tipo Areia Siltosa.

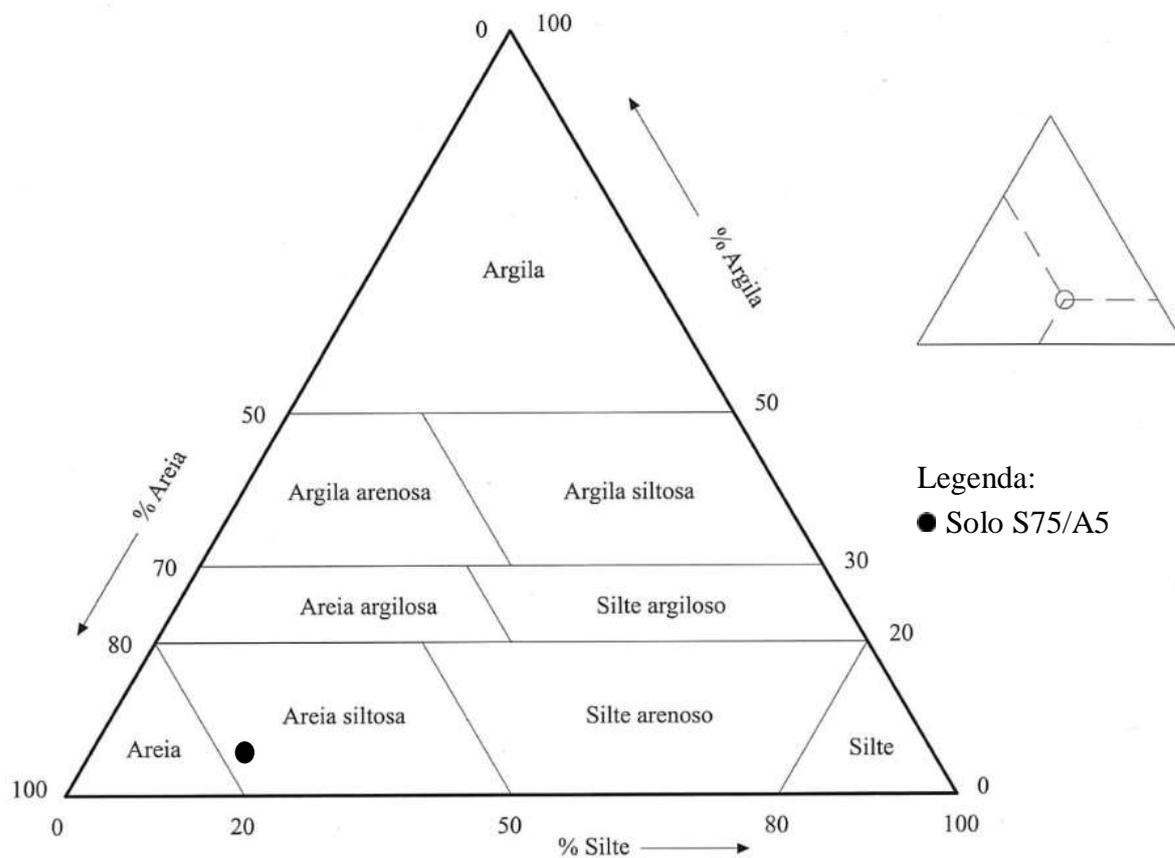


Figura 3.3 - Classificação granulométrica dos solos pelo triângulo de Feret (E219, 1968).

4 PROCEDIMENTO LABORATORIAL E PLANO DE ENSAIOS

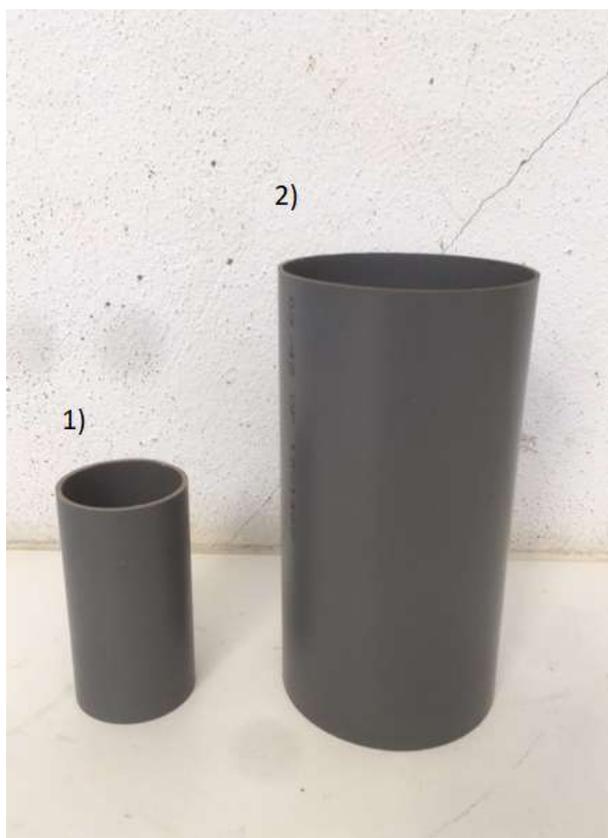
Neste capítulo apresentam-se os procedimentos laboratoriais executados de modo a estudar o comportamento do solo S75/A25, nomeadamente, a preparação dos provetes de solo, o ensaio de compressão simples (UCS), o ensaio edométrico, a calibração e a medição do teor de CaCO_3 , a medição do teor em água após os ensaios UCS, a medição do valor de pH das amostras bioestabilizadas, o ensaio DRX (X-Ray Diffraction) e o ensaio SEM (Scanning Electron Microscopes).

Com a realização destes ensaios será analisado o efeito da bioestabilização por via enzimática na deformabilidade do solo S75/A25, estabelecendo-se a correlação com a resistência à compressão simples, tendo em consideração o efeito da variação da dosagem dos agentes estabilizadores (ureia, cloreto de cálcio e *urease enzyme*) e o efeito do tempo de cura. Adicionalmente, serão medidos e registados os valores do pH e do teor de CaCO_3 das amostras bioestabilizadas.

A realização destes ensaios é então de extrema importância pois dada a complexidade das interacções físico-químicas e dos inúmeros factores que influenciam a mistura das partículas do solo com o ligante, não é possível prever à priori, o comportamento mecânico do solo tratado sem recurso aos ensaios laboratoriais (EuroSoilStab, 2001; EN 14679, 2005).

4.1 Características dos provetes do solo

De acordo com a Norma ASTM D 2166 (2000), nos ensaios UCS, o quociente entre a altura e o diâmetro (h/D) dos provetes de solo aconselhável é de 2:1, de modo a evitar problemas relacionados com a encurvadura. Como tal, optou-se por tubos de PVC com uma relação de 76/38 para a realização dos ensaios de compressão simples não confinada (UCS). Para a realização dos ensaios edométricos foram preparados provetes com uma relação de 140/70 a partir dos quais se obtiveram os provetes edométricos com diâmetro de 70 mm e com altura de 19 mm. A Figura 4.1 apresenta os tubos de PVC usados nos ensaios anteriormente mencionados e a sua respectiva legenda.



Legenda:

1 - Provete usado nos ensaios UCS

2 - Provete usado no ensaio edométrico

Figura 4.1 - Legenda dos provetes utilizados na montagem da amostra para o ensaio UCS e para o ensaio edométrico.

4.2 Preparação dos provetes de solo

Nesta secção pretende-se explicar a preparação dos provetes de solo, nomeadamente, a descrição do processo, os materiais utilizados, a preparação da solução estabilizadora e por fim, a compactação dos provetes de solo.

4.2.1 Descrição da preparação

Para a realização dos ensaios a desenvolver é necessário preparar amostras em laboratório, devendo a sua preparação obedecer a determinados critérios de modo a garantir a homogeneidade e reprodutibilidade das mesmas (Correia et al., 2008). O procedimento da preparação dos provetes de solo para a realização do ensaio UCS e para a realização do ensaio edométrico é muito semelhante e, de forma resumida, obedece aos seguintes passos:

Passo 1 - Desagregação das partículas de argila recorrendo a um almofariz de borracha, passando posteriormente no peneiro nº 200, de forma a garantir que todas as partículas de argila tenham uma dimensão inferior a 0,075 mm.

Passo 2 - Desagregação do saibro com o auxílio de um martelo, passando posteriormente no peneiro n^o 10, de forma a garantir que todas as partículas de saibro tenham uma dimensão inferior a 2 mm.

Passo 3 - Espalha-se, num tabuleiro, 0,75 kg de argila e 2,25 kg de saibro e procede-se à sua homogeneização. Repete-se este passo mais 15 vezes de modo a perfazer 48 kg do solo S75/A25, que é colocado num recipiente de grandes dimensoes.

Passo 4 - Transfere-se 1,5 kg do solo S75/A25 para um tabuleiro e coloca-se na estufa durante 24 horas (temperatura 105^o±5^o).

Passo 5 - Preparam-se os moldes de PVC cilíndricos de dimensoes 76/36 (h/D) e 140/70 (h/D), como referido na secção 4.2. A preparação destes moldes de PVC passa pela colocação de papel de filtro no fundo do molde com o auxílio de uma fita-cola e de uma tesoura. Nos moldes de PVC de dimensoes superiores coloca-se vaselina nas paredes internas, de modo a reduzir o atrito lateral entre estas e o solo, facilitando posteriormente o processo de extracção da amostra.

Passo 6 - Após as 24 horas em estufa, este é retirado e deixa-se arrefecer durante, aproximadamente, 1 hora.

Passo 7 - Prepara-se a solução estabilizadora, como se descreve na secção 4.2.3, de modo a garantir o teor de água óptimo e a concentração dos agentes estabilizadores a adicionar ao solo.

Passo 8 - Seguidamente, adiciona-se a solução preparada no passo 6 e procede-se à mistura desta com o solo, com o auxílio de uma pá e de uma espátula. Esta mistura deve ser feita com minúcia de forma a garantir que toda a solução é absorvida pelo solo e que não existem perdas de água para as paredes do tabuleiro.

Passo 9 - De imediato, procede-se à compactação da amostra por camadas com a mesma energia de compactação usada no Ensaio de Proctor Normal, de modo a garantir o peso volumico seco máximo. O processo de compactação está explicado na secção 4.2.4.

Passo 10 - Por fim, identificam-se todos os provetes de solo (dia, hora de preparação e tipo de solução) e colocam-se na câmara húmida durante o tempo de cura.

Repetem-se os passos de 4 a 10 de modo a preparar 24 provetes de PVC cilíndricos de dimensoes 76/38 (h/D) e 16 provetes de PVC cilíndricos de dimensoes 140/70 (h/D), utilizados nos ensaios de compressão simples (UCS) e edométrico, respectivamente. Todos estes passos estão ilustrados na Figura 4.2.



Figura 4.2 - Ilustração passo-a-passo da preparação dos provetes de solo.

4.2.2 Materiais utilizados

Segue-se uma lista detalhada de todos os materiais necessários à preparação dos provetes de solo:

-Almofariz
-Alonga

-Balança (limite erro $\pm 0,001$ g)
-Balança (limite erro $\pm 0,01$ g)

- Cápsulas
- Espátulas
- Estufa (temperatura $105^{\circ}\pm 5^{\circ}$)
- Etiquetas
- Extrator de provetes hidráulico;
- Fita-cola
- Garfo metálico
- Luvas
- Martelo
- Micro pipeta
- Moldes de PVC cilíndricos
- Papel de filtro
- Peneiros
- Pilão de borracha
- Pilão de compactação leve
- Recipiente de grandes dimensões
- Rolo
- Sacos plásticos
- Tabuleiros
- Tesoura
- Vaselina

4.2.3 Preparação da solução estabilizadora

Os produtos envolvidos na preparação da solução estabilizadora usados neste trabalho são: a água destilada, os agentes estabilizadores (cloreto de cálcio, a ureia e a enzima *urease* presentes na Figura 4.3) e uma solução tampão de fosfato de sódio.

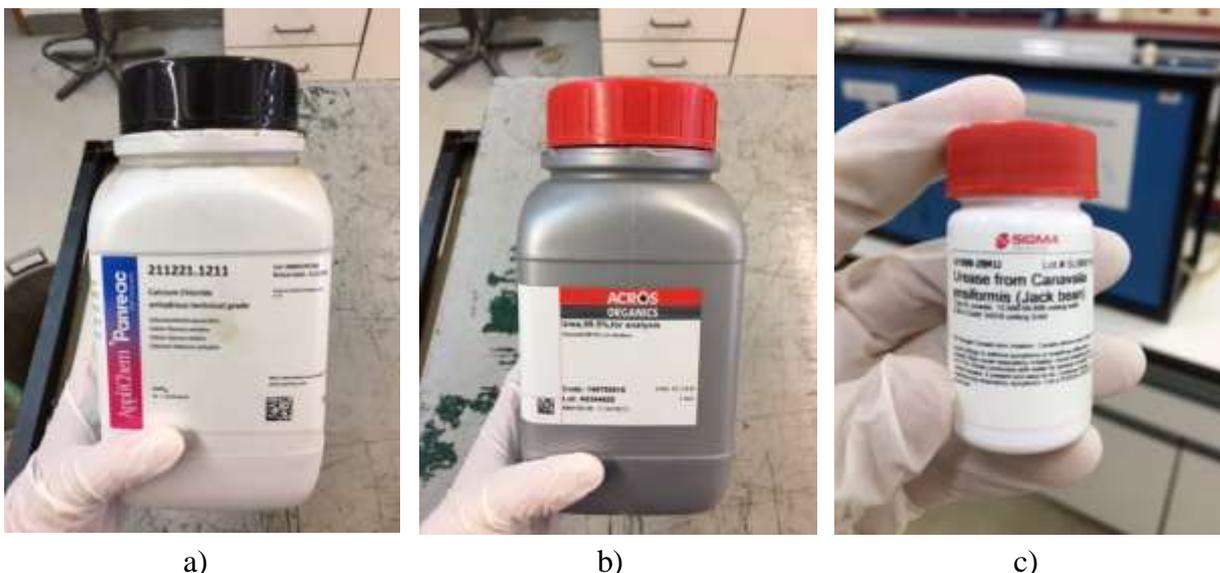


Figura 4.3 - Agentes estabilizadores usados na preparação da solução estabilizadora: a) Cloreto de cálcio; b) Ureia; c) Enzima *urease*.

A água foi obtida através de um sistema de destilação do DEC-FCTUC, a partir da água da rede pública com um pH próximo de 7. O cloreto de cálcio, que fornece à solução estabilizadora os iões de cálcio (Ca^{2+}), é um sal proveniente da AppliChem Panreac com uma pureza de 95% e apresenta uma massa molar de 110,99 g/mol. A ureia, que fornece à solução estabilizadora os iões de carbonato (CO_3^{2-}), é uma substância proveniente da Acros Organics com uma pureza de 99,5% e apresenta uma massa molar de 60,06 g/mol. A enzima *urease* foi fornecida pela companhia Sigma-Aldrich e, de acordo com o fabricante, apresenta uma

actividade de 34,31 kU/g (em estado sólido), sendo que 1 U corresponde à quantidade de *urease* que hidrolisa 1 μmol de ureia por minuto a 25 °C e pH 7. As enzimas foram armazenadas num frigorífico a uma temperatura entre os 2 °C e os 8 °C. De modo a garantir a actuação das enzimas, foi preparada uma solução tampão de fosfato de sódio no DEQ-FCTUC (Departamento de Engenharia Química da Universidade de Coimbra) de 0,2 M, que permite manter o pH próximo do valor óptimo.

O presente trabalho, como já referido, propõe correlacionar a deformabilidade com a resistência à compressão simples para o solo bioestabilizado para tempos de cura em câmara húmida de 3, 7, 14 e 28 dias. Adicionalmente, pretende-se correlacionar as grandezas anteriormente mencionadas para mais soluções, de modo a estudar a influência da dosagem dos agentes estabilizadores. A caracterização das 5 soluções distintas e as respectivas designações estão apresentadas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Dosagem dos agentes estabilizadores para as 5 soluções distintas.

Designação da solução estabilizadora	Agentes estabilizadores	
	Concentração ureia-CaCl ₂ (mol/L)	Concentração de <i>urease</i> (kU/L)
se ^(*)	0	0
ucl0,1875u1	0.1875	1
ucl0,375u2	0.375	2
base	0.75	4
ucl1,5u8	1.5	8

^(*) sem estabilização

Em primeiro lugar, é necessário calcular o volume de água para preparar 1,5 kg de solo, de acordo com o teor óptimo do solo em estudo definido na secção 3.5 (com uma margem de 1,5 % de modo a assegurar possíveis perdas), ou seja, $0,11 \times 1500 = 165$ mL. Seguidamente, de acordo com as concentrações (C) propostas para a ureia, cloreto de cálcio e *urease* (Quadro 4.1), calcula-se a quantidade de moles (n) necessárias a adicionar ao volume (V) de água conhecido, para as diferentes soluções, através da seguinte expressão:

$$C = \frac{n}{V} \text{ ou seja } n = C \times V \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Por fim, calcula-se a massa dos agentes estabilizadores (m), conhecendo previamente o número de moles (n) e a massa molar (M) de todas as substâncias envolvidas na solução estabilizadora, através da seguinte expressão:

$$n = \frac{m}{M} \text{ ou seja } m = n \times M \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Os 165 mL de água foram divididos em dois gobelés, o primeiro contendo 10 mL e o segundo contendo 155 mL. No primeiro gobelé adicionaram-se as enzimas e no segundo gobelé adicionou-se o cloreto de cálcio e a ureia, previamente pesados numa balança de alta precisão (Quadro B.2). Posteriormente, transferiram-se as duas soluções para um único gobelé e agitou-se até os materiais se dissolverem completamente e a solução ficar transparente. Por fim, adicionou-se a solução ao solo e procedeu-se à mistura até garantir a uniformidade do solo, isto é, que toda a massa tenha a mesma quantidade de água.

4.2.4 Compactação dos provetes

A compactação dos provetes de solo foi feita por camadas com a mesma energia de compactação usada no ensaio de Proctor Normal (Leve), garantindo o peso volúmico seco máximo, a fim de ensaiar as amostras no ensaio UCS no ensaio edométrico.

Inicialmente, o provete já com a alonga é colocado no suporte e, posteriormente, transfere-se a quantidade de solo necessário de modo a formar a primeira camada e coloca-se o pilão leve em contacto com o solo. Proceda-se então à compactação da amostra dando o número de pancadas suficientes de modo a garantir a energia de compactação desejada. Repete-se este processo mais 2 vezes até perfazer o volume total do provete de solo. No caso dos provetes de solo a ensaiar no ensaio edométrico, é usado um garfo metálico para escarificar a parte superficial das camadas em contacto, de modo a que a superfície de contacto destas não seja totalmente plana, evitando que estas deslizem uma sobre a outra após a extracção. Ao finalizar a última camada, retira-se o pilão leve, a alonga, o provete e, por fim, acerta-se o topo deste com o auxílio de uma espátula.

Os provetes de solo a ensaiar no ensaio UCS foram divididos em 3 camadas ($2+2+3=7$ pancadas) e as amostras de solo a ensaiar no ensaio edométrico foram, também estas, divididas em 3 camadas ($14+14+14=42$ pancadas). A marcha de cálculo com o objectivo de determinar o número de pancadas para obter a compactação desejada dos provetes de solo está detalhada no Anexo B.

4.3 Ensaio de compressão simples não confinada (UCS)

Após o processo de preparação dos provetes de solo devidamente explicado na secção 4.2.1, executa-se o ensaio de compressão simples não confinada (UCS) sobre o conjunto de amostras respeitando a Norma BS 1377-7 (1990).

Seguidamente, será explicado e detalhado a descrição deste ensaio, o tratamento de dados e posteriormente o plano de ensaios a realizar (secção 4.10.1).

4.3.1 Descrição do ensaio UCS

De modo a perceber o procedimento adoptado e descrito de seguida, entende-se por bem legendar o equipamento usado na realização destes ensaios, nomeadamente a prensa *WYKEHAM FARRANCE LTD Tristar 5000kg Stepless Compression Test Machine*, como ilustra a Figura 4.4.



Legenda:

- 1 - Célula de carga
- 2 - Placa de topo
- 3 - Provete de solo
- 4 - Transdutor de deslocamentos
- 5 - Base rígida

Figura 4.4 - Legenda da prensa usada nos ensaios UCS.

Para a realização dos ensaios de compressão simples não confinada (UCS), a fim de determinar a resistência mecânica das várias amostras já preparadas e devidamente explicadas na secção 4.2.1, optou-se por uma velocidade de deformação constante de 1%/min em relação à altura das amostras, ou seja, 0,760 mm/min. Este valor respeita a Norma ASTM D 2166 (2000) que recomenda valores de velocidade de deformação entre 0,5 e 2 %/min em relação à altura da amostra. De modo a obter um resultado o mais homogéneo possível e obedecendo à

Norma BS 1377-7 (1990), o procedimento adoptado para a realização do ensaio de compressão simples não confinada (UCS) descreve-se de seguida:

Passo 0 - Retiram-se os provetes a ensaiar da câmara húmida, respeitando o plano de ensaios descrito na secção 4.10.1.

Passo 1 - Procede-se à extracção dos provetes de solo com o auxílio do extractor hidráulico. Em primeiro lugar, retira-se a fita-cola e o papel de filtro do provete de solo. Seguidamente, ajusta-se a altura das placas e do anel do extractor e, com o auxílio do pilão, retira-se o provete de solo a ensaiar.

Passo 2 - Coloca-se o provete na prensa de ensaio e centra-se a amostra com a célula de carga, de modo a garantir, na medida do possível, que a carga é aplicada no centro geométrico do topo da amostra.

Passo 3 - Faz-se um ajuste fino, aproximando-se o provete, o mais possível, da célula de carga. De seguida, coloca-se a zero o valor medido pela célula de carga e o valor medido pelo transdutor de deslocamento.

Passo 4 - Inicia-se o ensaio de compressão simples não confinada, registando-se os valores de carga e deslocamento através de células de carga e do transdutor de deslocamentos, respectivamente.

Passo 5 - Dá-se por terminado o ensaio após o provete ter atingido a resistência máxima e se encontrar na curva descendente da tensão aplicada, gravando-se os dados obtidos no software TRIAX.

Passo 6 - Por fim, remove-se com cuidado o provete de solo ensaiado. Parte deste é usado para avaliar o teor de humidade, sendo a restante usada para avaliar o teor de CaCO_3 , o pH da amostra e para a realização dos ensaios SEM e XRD.

Repetem-se todos os passos descritos de modo a ensaiar os 24 provetes de dimensões 76/38 (h/D), respeitando o plano de ensaios detalhado na secção 4.10.1. Todos os passos anteriormente detalhados estão ilustrados na Figura 4.5.



Passo 0



Passo 1



Passo 2



Passo 3



Passo 4



Passo 5



Passo 6

Figura 4.5 - Ilustração passo-a-passo do ensaio UCS.

4.3.2 Tratamento de dados

A partir dos valores obtidos no ensaio descrito na secção 4.3.1, isto é, dos valores de força registados pela célula de carga e dos valores de deslocamento registados pelo transdutor de deslocamento, procede-se ao tratamento de dados de modo a construir gráficos de tensão - extensão, $\sigma - \epsilon$.

Através destes dados que são registados automaticamente pelo software TRIAX e conhecendo as dimensões geométricas do provete de solo, nomeadamente, a altura (h) e o diâmetro da secção transversal (D), expressa-se, através de uma folha de cálculo, a resistência à compressão não confinada (Eq. 4.3) e a extensão (Eq. 4.4). A área transversal da amostra foi corrigida de modo a considerar a deformação radial experimentada pelo provete de solo durante o ensaio (Eq. 4.5) (Head, 1982).

$$q_u = \frac{F}{A_c} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Onde:

q_u - Resistência à compressão não confinada

F - Força exercida sobre a amostra e registada na célula de carga

A_c - Área da secção transversal corrigida da amostra

$$\epsilon_a = \frac{\Delta\delta_v}{h} \times 100 \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Onde:

ϵ_a - Extensão axial

$\Delta\delta_v$ - Variação do deslocamento vertical

h - Altura do provete

$$A_c = \frac{\pi \times D^2}{4(1 - \frac{\epsilon_a}{100})} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Onde:

D - Diâmetro do provete

Com estes parâmetros devidamente calculados, pode-se traçar a curva tensão - extensão ($q_u - \epsilon$) para todos os provetes submetidos ao ensaio UCS. Com base nesta curva, pode-se avaliar a tensão máxima de compressão que corresponde ao ponto de rotura da amostra e o módulo de deformabilidade. O módulo de deformabilidade (E_{u50}) representa o declive da recta que passa

na origem e no ponto cujo a ordenada corresponde a 50% da tensão máxima de rotura (Eq. 4.6).

$$E_{u50} = \frac{q_{u50\%}}{\epsilon_{a50\%}} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Neste tipo de ensaios existem erros, chamados “bedding error”, que surgem devido ao ajuste inicial do aparelho de medição, onde na fase inicial se verifica a variação da deformação da amostra com uma variação mínima da tensão axial. Deste modo, surge a necessidade de corrigir a curva tensão – extensão ($q_u - \epsilon$), não alterando as características da curva de ensaio, como ilustra a Figura 4.6.

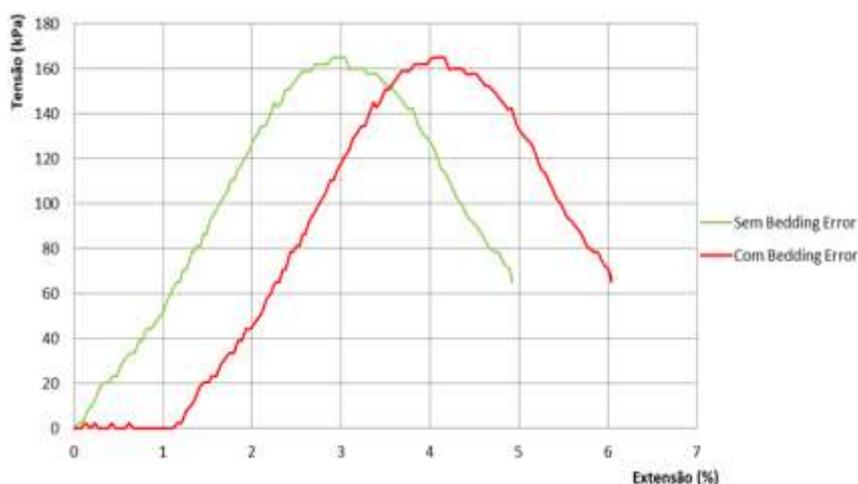


Figura 4.6 - Correção do *bedding error* na curva $q_u - \epsilon$.

4.4 Ensaio edométrico

Após o processo de preparação das amostras, explicado na secção 4.2.1, executa-se o ensaio edométrico sobre o conjunto de amostras, respeitando a Norma BS 1377-5 (1990) com o objectivo de determinar os parâmetros de compressibilidade do solo em estudo.

Seguidamente, será explicado e detalhado o equipamento, a descrição do ensaio e posteriormente o plano de ensaios a realizar (secção 4.10.2).

4.4.1 Descrição do equipamento

De modo a perceber o procedimento adoptado e descrito de seguida padronizado pela Norma BS 1377-5 (1990), entende-se por bem legendar o equipamento usado na realização destes ensaios. Os edómetros de pequena capacidade utilizados são constituídos, essencialmente, por um suporte para a colocação dos pesos, um braço da alavanca, um parafuso existente para

impedir o movimento da alavanca, uma célula edométrica, um transdutor de deslocamento para registo automático de deformações e um contrapeso, como ilustra a Figura 4.7.

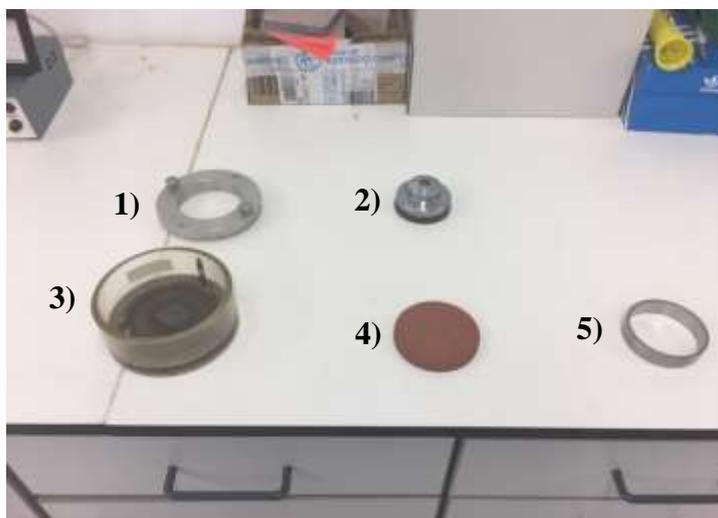


Legenda:

- 1 - Suporte para a colocação dos pesos
- 2 - Braço da alavanca
- 3 - Parafuso para impedir o movimento da alavanca
- 4 - Célula edométrica
- 5 - Transdutor de deslocamento para registo automático de deformações
- 6 - Contrapeso

Figura 4.7 - Descrição do edómetro de pequena capacidade.

De uma forma ainda mais detalhada, a célula edométrica é constituída por: a peça de fixação do anel, uma pedra porosa inferior, o anel edométrico, a pedra porosa superior e a peça que distribui a carga uniformemente por toda a área da amostra, como ilustra a Figura 4.8.



Legenda:

- 1 - Peça de fixação do anel
- 2 - Peça para distribuir a carga uniformemente por toda a área da amostra + pedra porosa superior
- 3 - Célula edométrica
- 4 - Pedra porosa inferior
- 5 - Anel edométrico

Figura 4.8 - Legenda da célula edométrica.

4.4.2 Descrição do ensaio edométrico

Antes da execução destes ensaios, efectuou-se a calibração dos transdutores de deslocamento. De modo a obter um resultado o mais homogéneo possível e obedecendo à Norma supracitada, o procedimento adoptado para a realização deste ensaio respeitou os seguintes passos:

Passo 0 - Retira-se o provete a ensaiar da câmara húmida, respeitando o plano de ensaios descrito na secção 4.10.2.

Passo 1 - Procede-se à montagem da amostra:

Passo 1.1 - Executa-se a extracção dos provetes de solo com o auxílio do extractor hidráulico. Em primeiro lugar, retira-se a fita-cola e o papel de filtro do provete de solo. Seguidamente, ajusta-se a altura das placas e, com o auxílio do pilão, retira-se o provete de solo.

Passo 1.2 - Regista-se a massa do anel edométrico e a massa da borracha.

Passo 1.3 - Unta-se o anel com vaselina para facilitar a extração da amostra no fim do ensaio e, de seguida, crava-se o anel edométrico na amostra de solo e acertam-se os topos com o auxílio de uma espátula. As aparas do solo que sobram deste acerto são utilizadas para verificar se o teor de humidade inicial da amostra coincide com o teor óptimo (Quadro C.6).

Passo 1.4 - Regista-se a massa do conjunto anel + amostra + borracha. Conhecendo a massa do conjunto e descontando-se as massas registadas no passo 1.1, sabe-se a massa inicial da amostra húmida. Posteriormente, após o passo 4, sabe-se o teor de água inicial e o peso volúmico seco inicial.

Passo 1.5 - Coloca-se a pedra porosa inferior, previamente saturada, o anel edométrico e a amostra na célula edométrica e um papel de filtro de forma a separar a amostra da pedra porosa superior. De seguida, coloca-se a peça de fixação do anel edométrico e por fim, a peça que distribui a carga uniformemente por toda a área da amostra.

Passo 1.6 - Instala-se a célula edométrica no edómetro garantindo a centralidade do transdutor de deslocamento para registo automático de deformações. De imediato, enche-se a célula edométrica com água, com o auxílio de um esguicho. Ao longo do ensaio, sempre que necessário, adiciona-se água de modo a garantir a saturação da amostra.

Passo 2 - Procede-se ao carregamento da amostra:

Passo 2.1 - No início de cada bateria de ensaios, posiciona-se a peça que transmite a carga da alavanca para a amostra e os transdutores de deslocamento. Todos os pesos são posteriormente colocados num braço de carga com um factor multiplicativo de 11,04.

Passo 2.2 - Ajusta-se o parafuso para apoio da alavanca, antes da colocação dos pesos.

Passo 2.3 - Colocam-se os pesos no suporte (primeiro escalão 0-0,250 kg).

Passo 2.4 - Desaperta-se o parafuso existente por baixo da alavanca de modo a promover a aplicação instantânea da carga.

Passo 2.5 - Consolidação da amostra. Cada escalão de carga é mantido por um período de 3 horas, registando-se leituras da deformação vertical da amostra num intervalo de tempo de 3, 5, 30, 60, 300 segundos durante 2, 5, 8, 15 minutos, respectivamente.

Passo 2.6 - Duplica-se a carga até ao escalão de 32 kg repetindo os passos 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5.

Passo 2.7 - Proceda-se à descarga da amostra. A carga vai sendo progressivamente reduzida para $\frac{1}{4}$ da anterior, até à descarga total, ou seja, de 32 kg para 8 kg, de 8 kg para 2 kg, de 2 kg para 0,5 kg e por fim, de 0,5 kg para 0 kg.

Passo 3 - Proceda-se à extracção do anel edométrico da célula edométrica. Determina-se a deformação experimentada pela amostra com o auxílio de um paquímetro digital. Regista-se a massa de uma cápsula e do conjunto anel + cápsula + amostra húmida. Sabendo a massa do conjunto e descontando a massa do anel e da cápsula, calcula-se a massa do provete húmido. De seguida, coloca-se o conjunto na estufa durante 24 horas.

Passo 4 - Retira-se o conjunto da estufa e coloca-se no exsiccador durante 1 hora. Depois, regista-se a massa do conjunto anel + cápsula + amostra seca. Sabendo a massa do conjunto e descontando a massa do anel e da cápsula, calcula-se a massa do provete seco. Ora, conhecendo a massa do provete seco e a massa do provete húmido (passo 3), calcula-se o teor de água final. Por fim, admitindo que a saturação da amostra é de 100% e conhecendo o valor da densidade das partículas sólidas, determina-se o índice de vazios final da amostra ($e_f = G_s \times W$).

Durante o ensaio, todos os dados (deformações verticais e tempo) foram registados e gravados através do software TRIAX. Posteriormente e através de uma aplicação, converte-se os dados registados no programa TRIAX para uma folha de Excel a fim de tratar os dados obtidos ao longo do ensaio. Todos os passos anteriormente descritos estão apresentados na Figura 4.9.

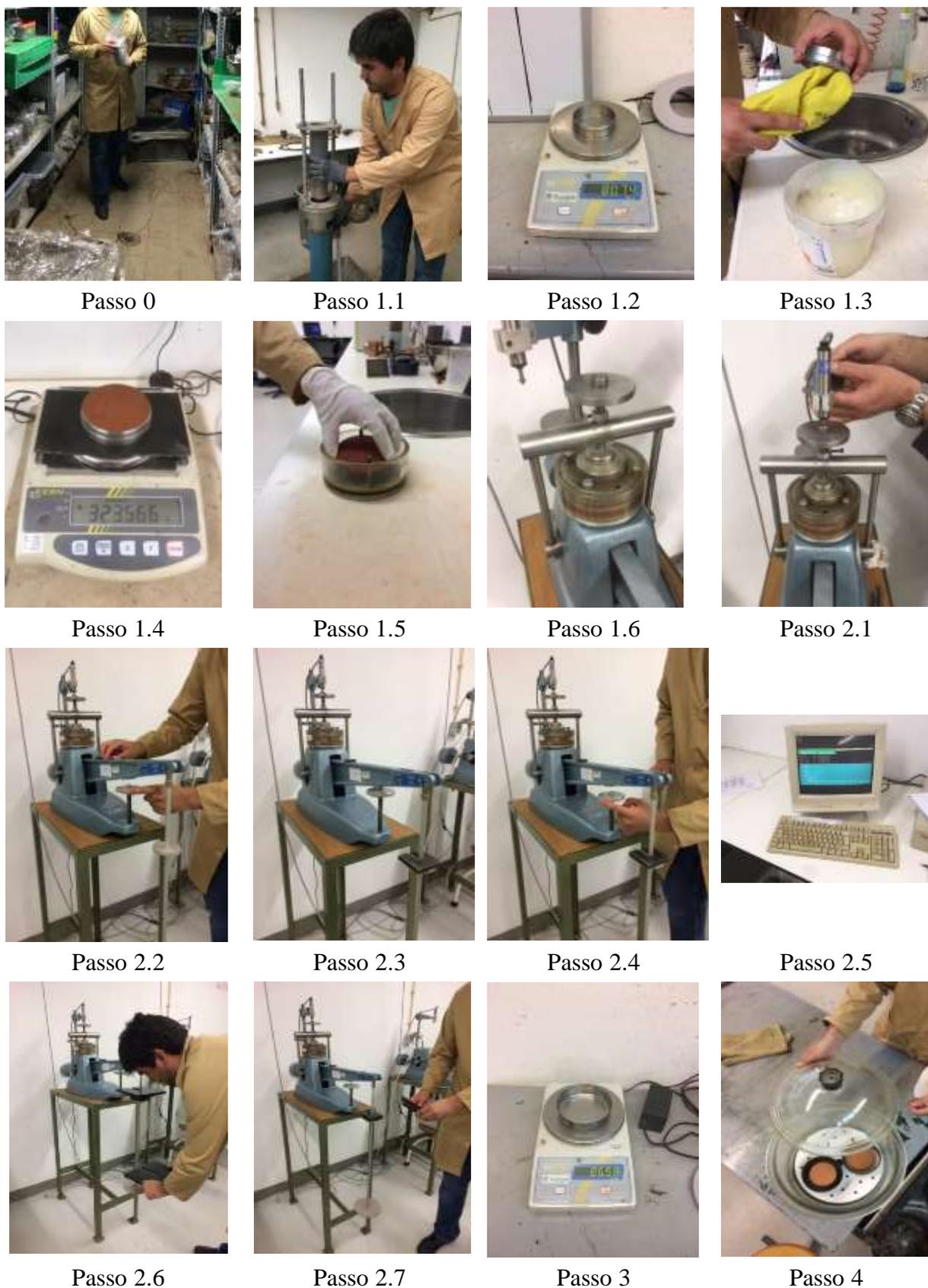
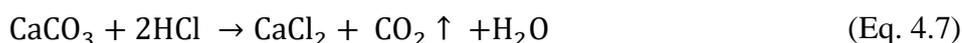


Figura 4.9 - Ilustração passo-a-passo do ensaio edométrico.

4.5 Medição do precipitado CaCO_3

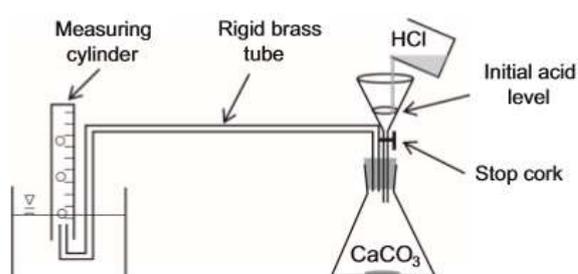
4.5.1 Calibração

Para avaliar o teor de carbonato de cálcio é necessário a calibração prévia do sistema de medição que relaciona a massa de CaCO_3 com o volume de dióxido de carbono libertado após adição de ácido clorídrico (HCl), descrito pela seguinte equação e ilustrado na Figura 4.10 (Neupane et al., 2015).



De acordo com a bibliografia supracitada o procedimento adoptado é descrito de seguida:

1. Introduce-se, inicialmente, uma massa conhecida de CaCO_3 (puro ou misturado com solo) num recipiente.
2. De seguida, fecha-se o recipiente com uma rolha com dois furos que permite a ligação a um funil (com válvula acoplada) e a uma haste de vidro. A haste de vidro liga o recipiente a um tubo de medida, previamente cheio com água.
3. Adiciona-se no funil 20 mL (2,5 mol) de HCl provenientes de uma solução previamente preparada. No funil, com o auxílio de um marcador, faz-se um traço que identifica o volume de 10 mL da solução.
4. Abre-se a válvula do funil até 10 mL da solução descer e entrar em contacto com o CaCO_3 . A reacção descrita pela equação 4.7 inicia-se, libertando-se dióxido de carbono. Regista-se o volume de dióxido de carbono libertado através do tubo de medida.
5. Representa-se, graficamente, o volume de dióxido de carbono útil (descontando os 10 mL de HCl) em função da massa do precipitado de carbonato de cálcio.



a)



b)

Figura 4.10 - Sistema de medição do carbonato de cálcio: a) Esquema teórico (Neupane et al., 2015); b) Esquema real.

Teoricamente, quando o rendimento da reacção é 100%, a massa do precipitado de carbonato de cálcio (m_t) pode ser dada pelo produto da concentração dos reagentes (C), da massa molar de CaCO_3 (M) e do volume da solução (V), descrito pela seguinte equação:

$$m_t = C \times M \times V \quad (\text{Eq. 4.8})$$

A Figura 4.11 apresenta a calibração do sistema de medição do CaCO_3 , respeitando o processo anteriormente detalhado. Na mesma Figura, pode-se observar a recta teórica (Eq. 4.8) e a regressão linear que permite conhecer a massa do precipitado em função do volume de dióxido carbono libertado (Eq. 4.9).

$$V_{\text{CO}_2} = 209.93 \times m_{\text{CaCO}_3} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

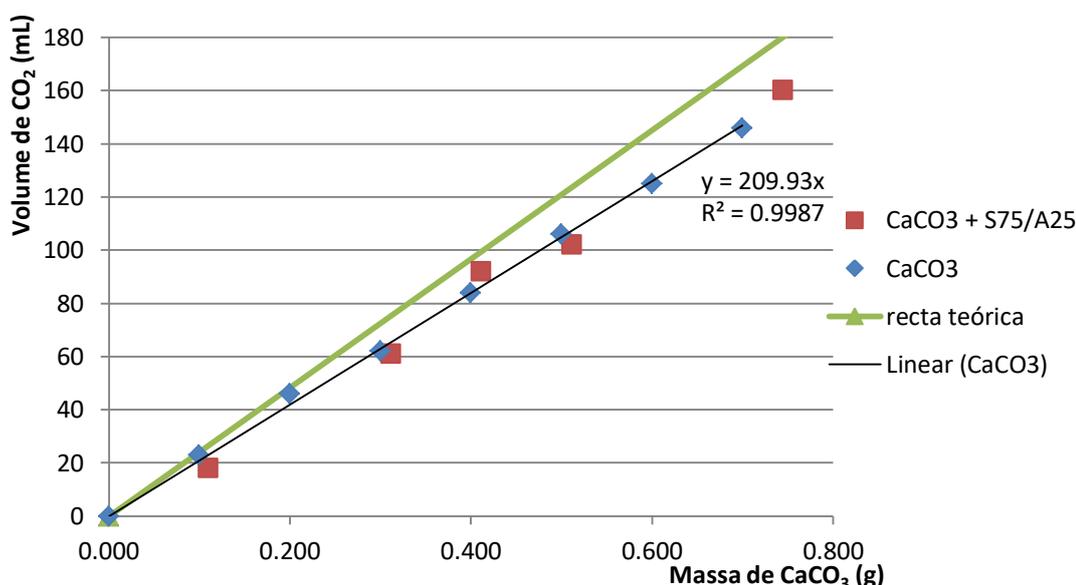


Figura 4.11 - Calibração do sistema de medição do carbonato de cálcio a partir do dióxido carbono libertado.

4.5.2 Medição do teor de CaCO_3 nos provetes após os ensaios UCS

A medição do teor de CaCO_3 em amostras bioestabilizadas após a realização dos ensaios UCS segue o procedimento descrito na secção 4.5.1. Sabendo à priori a massa de solo introduzida ($m_{\text{solo intr}}$), calcula-se a massa de CaCO_3 presente na amostra através do volume de dióxido de carbono libertado (Eq. 4.9) e, por fim, determina-se o teor do carbonato de cálcio através da seguinte expressão:

$$\%_{\text{CaCO}_3} = \frac{m_{\text{CaCO}_3}}{m_{\text{solo intr}}} \times 100 \quad (\text{Eq. 4.10})$$

4.6 Medição do teor em água dos provetes após os ensaios UCS

A determinação do teor em água (W) dos provetes de solo bioestabilizados (Quadro C.2) realiza-se de acordo com a norma NP-84 1965, respeitando a seguinte expressão:

$$W = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100 \quad (\text{Eq. 4.11})$$

Onde:

m₁ - massa da cápsula

m₂ - massa da cápsula + solo húmido

m₃ - massa da cápsula + solo seco

4.7 Medição do pH do solo bioestabilizado após os ensaios UCS

A medição do pH das amostras de solo bioestabilizadas, após os ensaios UCS, segue o mesmo procedimento adoptado na determinação do pH do solo natural, descrito na secção 3.6 e encontra-se indicado no Quadro C.3

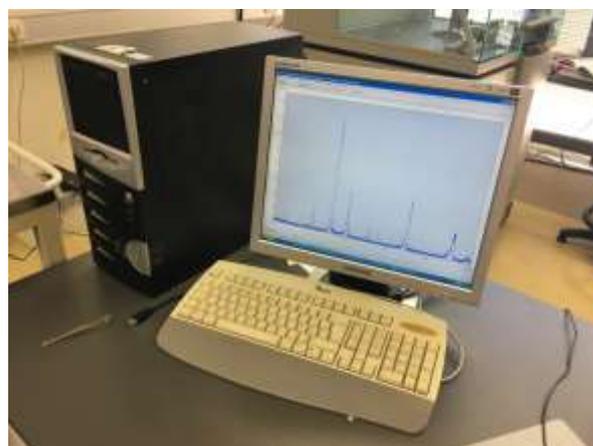
4.8 Ensaios XRD

O ensaio XRD (X-Ray Diffraction) tem como objectivo identificar a presença do carbonato de cálcio nas amostras bioestabilizadas.

A Figura 4.12 apresenta a realização do ensaio XRD no IPN (Instituto Pedro Nunes) sobre uma amostra bioestabilizada.



a)



b)

Figura 4.12 - Realização do ensaio XRD: a) Equipamento usado no ensaio: Philips X'Pert; b) Interpretação de resultados *in situ*.

4.9 Ensaios SEM

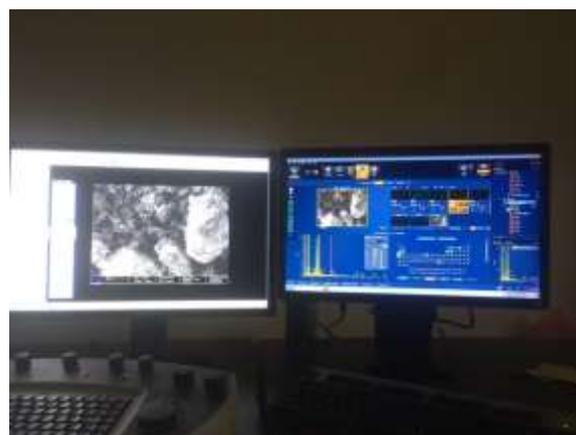
Os ensaios SEM (Scanning Electron Microscops) foram, também estes, realizados no IPN e têm como objectivo identificar a presença de calcite nas amostras bioestabilizadas através da análise química. Este ensaio permite ainda observar as diferenças a nível estrutural, entre o solo estabilizado e o solo não estabilizado.

Este ensaio inicia-se com a aplicação de uma camada de ouro (Au) sobre as amostras, de forma a aumentar o seu potencial condutor. Posteriormente, através do microscópio Zeiss Merlin Gemini II, observa-se imagens ampliadas e a partir do varrimento de um raio de electrões pela amostra, obtém-se a análise química e o mapeamento da amostra em estudo.

A Figura 4.13 apresenta a realização do ensaio SEM sobre uma amostra sem estabilização, onde se pode observar, em tempo real, o perfil topográfico da amostra e a sua composição química.



a)



b)

Figura 4.13 - Realização do ensaio SEM: a) Microscópio Zeiss Merlin Gemini II; b) Interpretação de resultados *in situ*.

4.10 Plano de ensaios

Este subcapítulo apresenta o plano de ensaios a realizar com o objectivo de estudar o comportamento mecânico do solo em estudo, considerando o efeito da influência do tempo de cura para o caso base (concentração equimolar ureia- CaCl_2 de 0.75 mol/L e concentração de *urease* de 4 kU/L) e o efeito da variação da concentração dos agentes estabilizadores, encontrando-se se dividido em duas secções. A primeira secção diz respeito aos ensaios UCS e engloba a medição do teor do precipitado, a medição do teor em água e a medição do pH do solo bioestabilizado. A segunda secção diz respeito aos ensaios edométricos.

4.10.1 Ensaio de compressão simples (UCS)

De modo a avaliar a resistência à compressão não confinada (q_u) e o módulo de deformabilidade (E_{u50}) sobre as amostras do solo S75/A25, elaborou-se um plano de ensaios para a realização dos ensaios de compressão simples não confinada (UCS), como ilustra o Quadro 4.2. Complementarmente, apresenta-se ainda a medição do teor em água, a medição do teor do precipitado e a medição do pH sobre as amostras bioestabilizadas.

Quadro 4.2 - Plano para a realização dos ensaios UCS.

Agentes estabilizadores		Tempo de cura em câmara húmida (dias)	Velocidade de deformação (mm/min)	Nº de provetes ensaiados (un)	Med. do w/ prov	Med. do teor CaCO_3 / prov	Med. do pH/ prov
Concentração ureia- CaCl_2 (mol/L)	Concentração <i>urease</i> (kU/L)						
0	0	-	0.760	3	2	2	1
0.1875	1	14		3	2	2	1
0.375	2	14		3	2	2	1
0.75	4	3		3	2	2	1
0.75	4	7		3	2	2	1
0.75	4	14		3	2	2	1
0.75	4	28		3	2	2	1
1.5	8	14		3	2	2	1

4.10.2 Ensaio edométrico

De modo a avaliar a deformabilidade do solo bioestabilizado, elaborou-se um plano para a realização dos ensaios edométricos com o objectivo de determinar os parâmetros de compressibilidade. O Quadro 4.3 apresenta o plano para a realização destes ensaios.

Quadro 4.3 - Plano para a realização dos ensaios edométricos.

Agentes estabilizadores		Tempo de cura em câmara húmida (dias)	Duração dos escalões de carga (horas)	Nº de provetes ensaiados (un)
Concentração ureia- CaCl_2 (mol/L)	Concentração <i>urease</i> (kU/L)			
0	0	-	3	2
0.1875	1	14	3	2
0.375	2	14	3	2
0.75	4	3	3	2
0.75	4	7	3	2
0.75	4	14	3	2
0.75	4	28	3	2
1.5	8	14	3	2

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos dos vários ensaios, nomeadamente, do ensaio de compressão simples (UCS), da medição do teor em CaCO_3 , da medição do pH, do ensaio edométrico, do ensaio DRX (Difração do raio-X) e do ensaio SEM (Scanning Electron Microscopes), resultantes do processo de bioestabilização devido à precipitação de CaCO_3 por via enzimática.

Dos ensaios anteriormente expostos, são discutidos diversos parâmetros, como a resistência à compressão simples (q_u), o módulo de deformabilidade (E_{u50}), o teor de CaCO_3 , o pH e os parâmetros de compressibilidade do solo, analisando, separadamente, o efeito da variação do tempo de cura e da variação da dosagem da solução estabilizadora.

De modo a apresentar os resultados de forma mais clara e sucinta, o Quadro 5.1 apresenta as condições e a concentração dos agentes estabilizadores comuns a todos os ensaios realizados, assim como a respectiva nomenclatura. Por exemplo, a nomenclatura *ucl0,375u2_tc14*, significa que o provete ensaiado tem uma concentração equimolar de ureia-cloreto de cálcio de 0,375 mol/L, uma concentração de *urease* de 2 kU/L e um tempo de cura em câmara húmida de 14 dias.

Quadro 5.1 - Nomenclatura atribuída a todos os ensaios realizados.

Agentes estabilizadores		Tempo de cura em câmara húmida (dias)	Nomenclatura
Concentração ureia- CaCl_2 (mol/L)	Concentração <i>urease</i> (kU/L)		
0.75	4	3	base_tc3
		7	base_tc7
		14	base_tc14
		28	base_tc28
0	0	14	se_tc14
0.1875	1	14	ucl0,1875u1_tc14
0.375	2	14	ucl0,375u2_tc14
0.75	8	14	ucl1,5u8_tc14

5.1 Efeito da variação do tempo de cura em câmara húmida

Como referido anteriormente, nesta secção, analisa-se, para uma concentração equimolar ureia-cloreto de cálcio de 0,75 mol/L e uma concentração de *urease* de 4 kU/L, o efeito do tempo de cura em câmara húmida (3, 7, 14 e 28 dias).

5.1.1 Resistência à compressão (q_u) e módulo de deformabilidade (E_{u50})

A Figura 5.1 representa a evolução das curvas tensão - extensão ($q_u - \epsilon_a$) para o solo S75/A25 bioestabilizado, para tempos de cura de 3, 7, 14 e 28 dias. As curvas sugerem um ligeiro aumento da compressão simples não confinada (q_u) e da rigidez para os provetes com maior tempo de cura, indicando que o processo de bioestabilização ocorre ao longo do tempo.

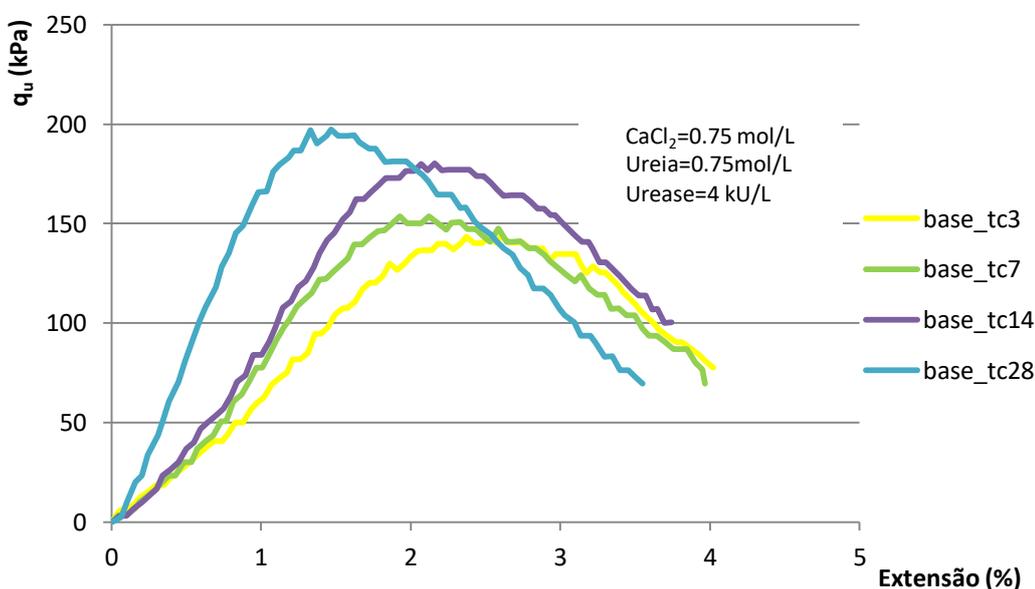


Figura 5.1 - Curvas tensão - extensão ($q_u - \epsilon_a$) para os ensaios UCS realizados sobre os provetes de solo bioestabilizados (para a solução estabilizadora base).

A Figura 5.2 apresenta a variação da resistência à compressão não confinada (q_u) e do módulo de deformabilidade (E_{u50}) com o tempo de cura. Os resultados mostram que a resistência à compressão não confinada aumenta com o aumento do tempo de cura, sendo a sua evolução mais acentuada nos primeiros dias e estabilizando dos 14 para os 28 dias de cura. O módulo de deformabilidade também aumenta com o tempo de cura, registando-se um aumento mais acentuado dos 14 para os 28 dias. Os resultados corroboram as conclusões apresentadas por Carmona (2016) e Carmona et al. (2018), obtidas com uma Areia SP-SM com cascalho.

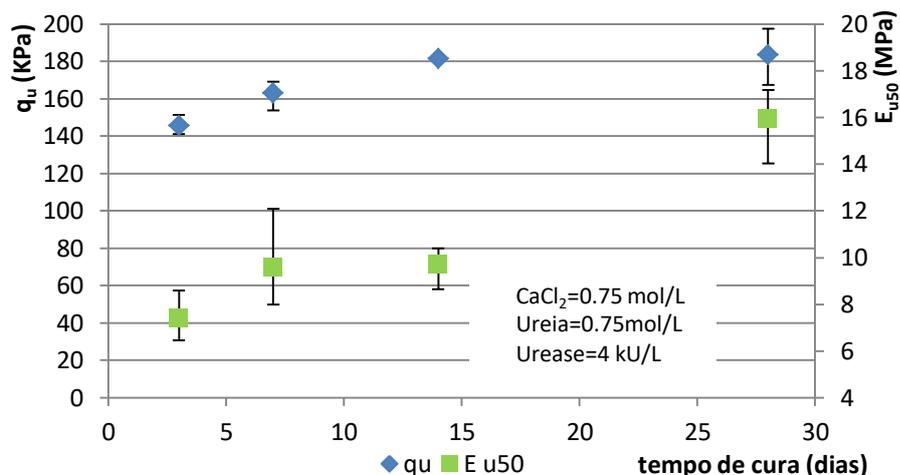


Figura 5.2 - Resistência à compressão não confinada (q_u) e módulo de deformabilidade (E_{u50}) vs tempo de cura em câmara húmida (para a solução estabilizadora base).

5.1.2 Teor do carbonato de cálcio e pH do solo bioestabilizado

A Figura 5.3 mostra a evolução do pH e do teor de CaCO_3 do solo S75/A25 estabilizado com o tempo de cura. O teor de CaCO_3 medido evolui nos primeiros dias (entre os 3 e os 14 dias de cura), não se tendo registado um aumento do teor de CaCO_3 a partir dos 14 dias de cura. O pH do solo estabilizado aumenta ligeiramente com o aumento do tempo de cura (de 7,42 para 7,80), sendo a sua evolução mais acentuada nos primeiros dias de cura. A variação do pH com o tempo de cura não é completamente concordante com os resultados obtidos com uma Areia SP-SM com cascalho, apresentados por Carmona (2016) e Carmona et al. (2018), tendo estes autores obtido um ligeiro decréscimo do pH do solo bioestabilizado com o tempo de cura (de 7,9 para 7,6), sugerindo que a medição do valor do pH do solo estabilizado pode ser sensível ao tipo de solo que é alvo do processo de bioestabilização.

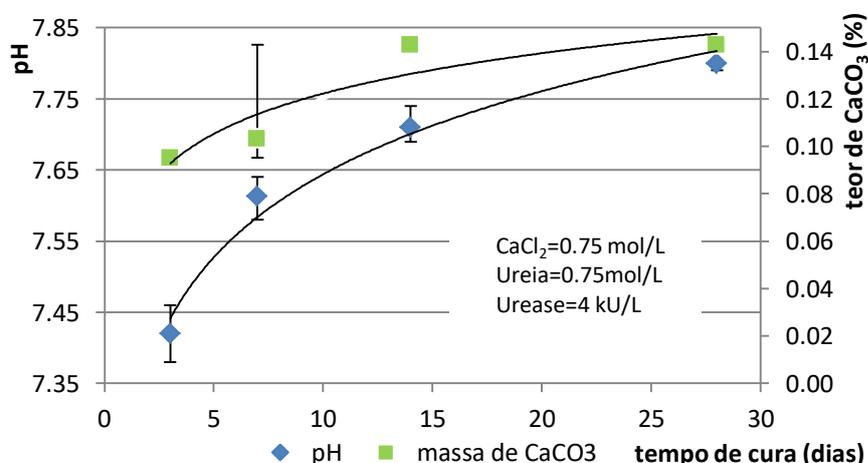
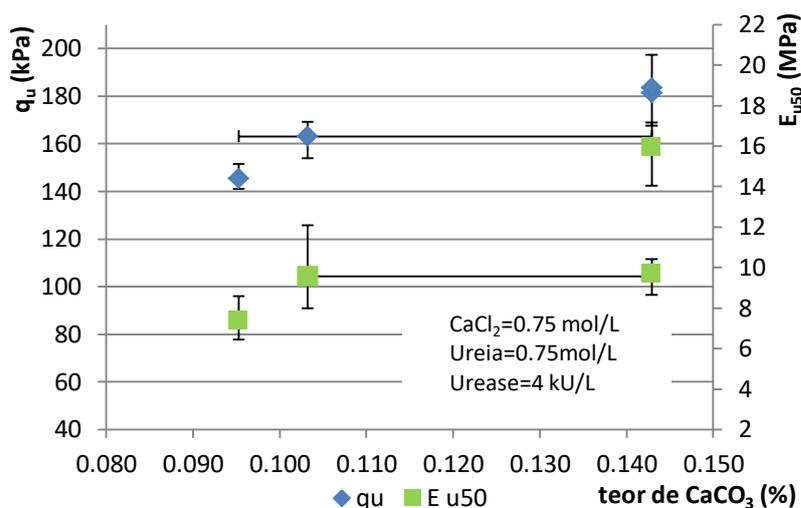
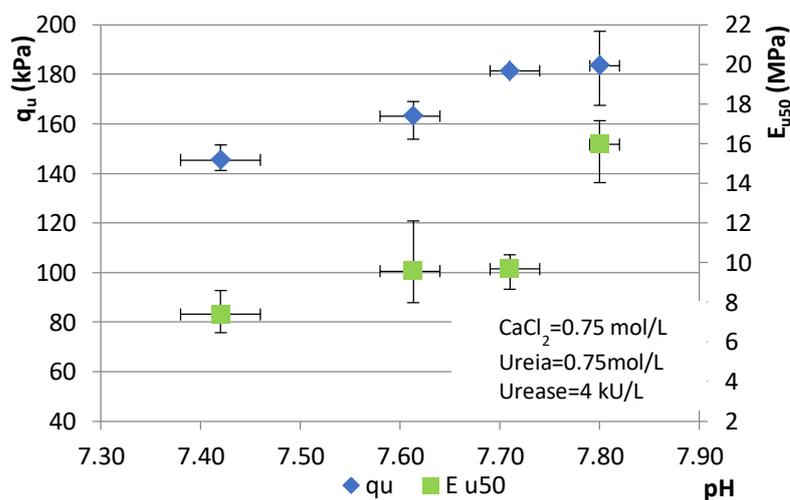


Figura 5.3 - Valores do pH e do teor de CaCO_3 do solo bioestabilizado vs tempo de cura em câmara húmida (para a solução estabilizadora base).

A Figura 5.4 confronta os resultados anteriormente expostos da resistência à compressão simples não confinada (q_u) e do módulo de deformabilidade (E_{u50}) com o teor de CaCO_3 e com o pH do solo. A Figura 5.4 a) mostra que os parâmetros mecânicos crescem com o aumento da precipitação de CaCO_3 , sendo este efeito mais notório para menores teores do carbonato de cálcio. A Figura 5.4 b) revela que o aumento da resistência à compressão simples não confinada e do módulo de deformabilidade está associado ao aumento do pH do solo S75/A25.



a)



b)

Figura 5.4 - Valores da resistência à compressão (q_u) e do módulo de deformabilidade (E_{u50}) do solo estabilizado: a) Em relação ao teor de CaCO_3 ; b) Em relação ao pH.

5.1.3 Parâmetros da compressibilidade do solo

A Figura 5.5 representa as curvas edométricas obtidas com o solo bioestabilizado para os vários tempos de cura (3, 7, 14 e 28 dias). Através da aplicação do método de Casagrande, explicado na secção 2.7, é estimada a tensão vertical de cedência (σ'_p), assim como são calculados os parâmetros de compressibilidade do solo, C_C e C_R , dados pelas expressões 2.7 e 2.8, respectivamente.

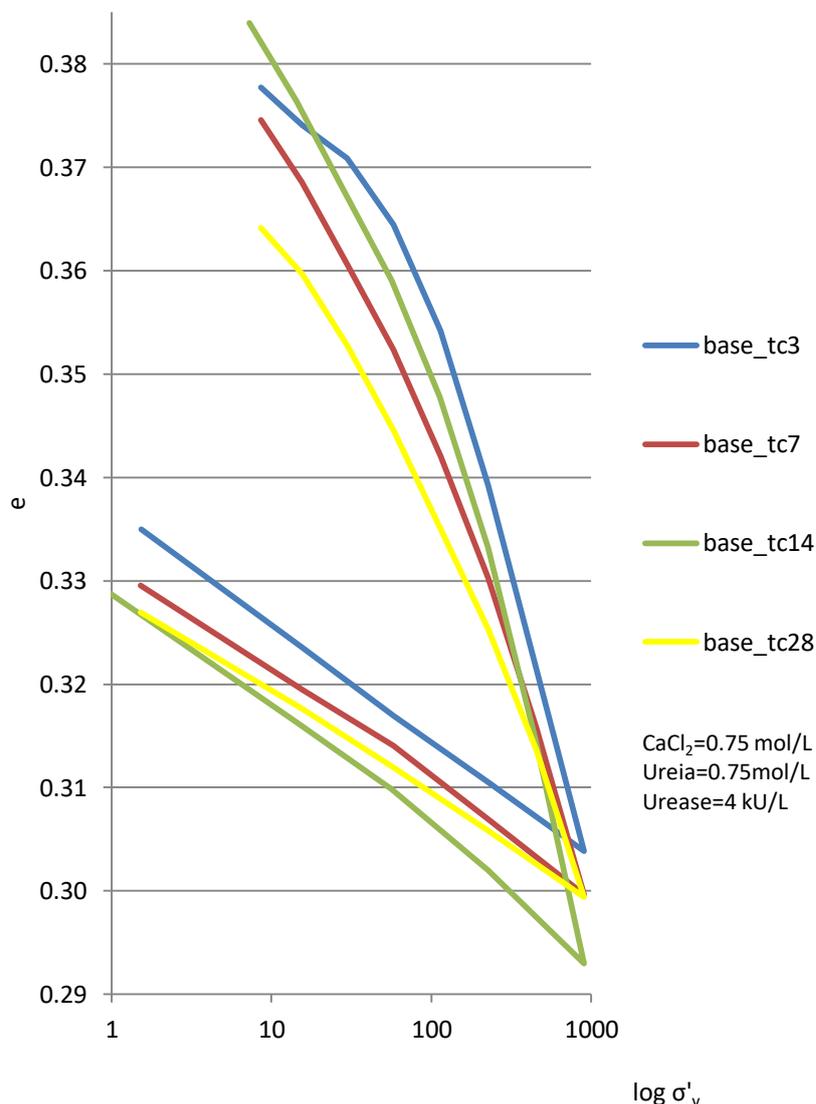


Figura 5.5 - Curvas $\log \sigma'_v - e$ para os ensaios edométricos realizados sobre os provetes de solo bioestabilizados (para a solução estabilizadora base).

A Figura 5.6 ilustra a evolução da tensão vertical de cedência do solo S75/A25 estabilizado (solução estabilizadora base) com o tempo de cura. Os resultados sugerem que a tensão de cedência aumenta com o aumento do tempo de cura, observando-se dos 14 para os 28 dias de cura, uma ligeira diminuição.

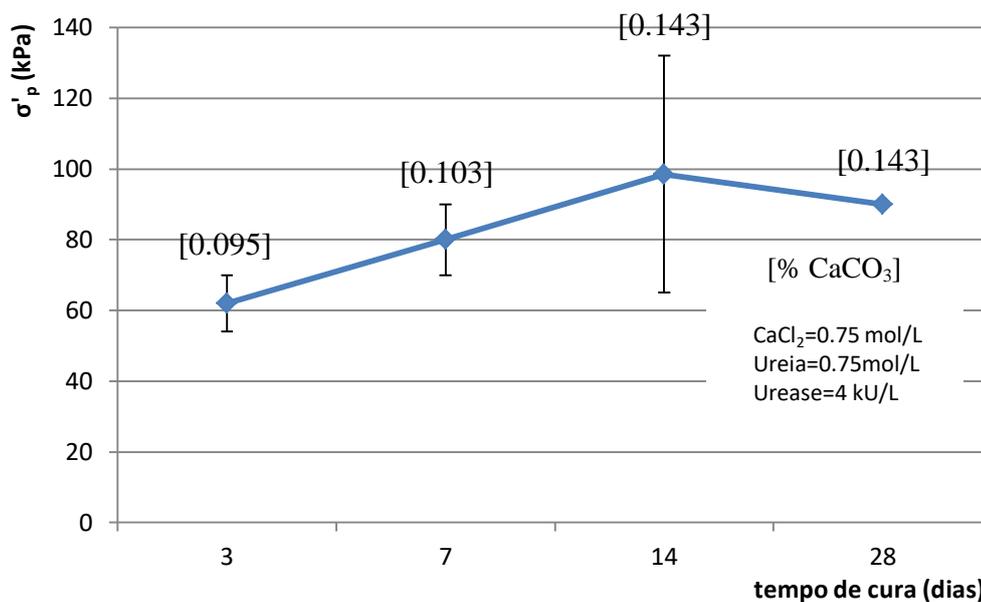


Figura 5.6 - Valores da tensão vertical de cedência vs tempo de cura (para a solução estabilizadora base).

A Figura 5.7 evidencia a avaliação do índice de compressibilidade (C_C) e do índice de recompressibilidade (C_R) para os diferentes tempos de cura. De acordo com a mesma, não há uma relação lógica destes parâmetros com a variação do tempo de cura, assumindo os parâmetros de compressibilidade do solo, praticamente, o mesmo valor ao longo do tempo de cura.

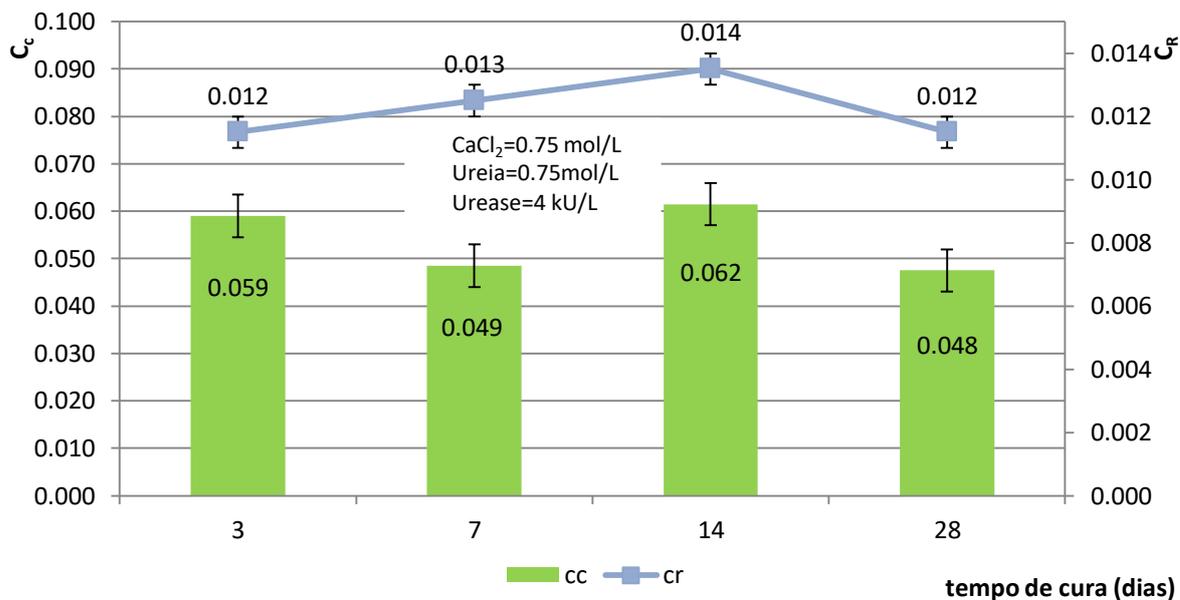


Figura 5.7 - Valores do índice de compressibilidade (C_C) e do índice de recompressibilidade (C_R) vs tempo de cura (para a solução estabilizadora base).

5.1.4 Relação entre a resistência (q_u) e a tensão de cedência (σ'_p)

A Figura 5.8 apresenta a relação linear entre os valores da resistência à compressão e os valores da tensão vertical de cedência para a solução estabilizadora base. Como expectável, os resultados indicam uma boa correlação entre estes dois parâmetros, os quais estão relacionados com o grau de estabilização promovido pela técnica em análise.

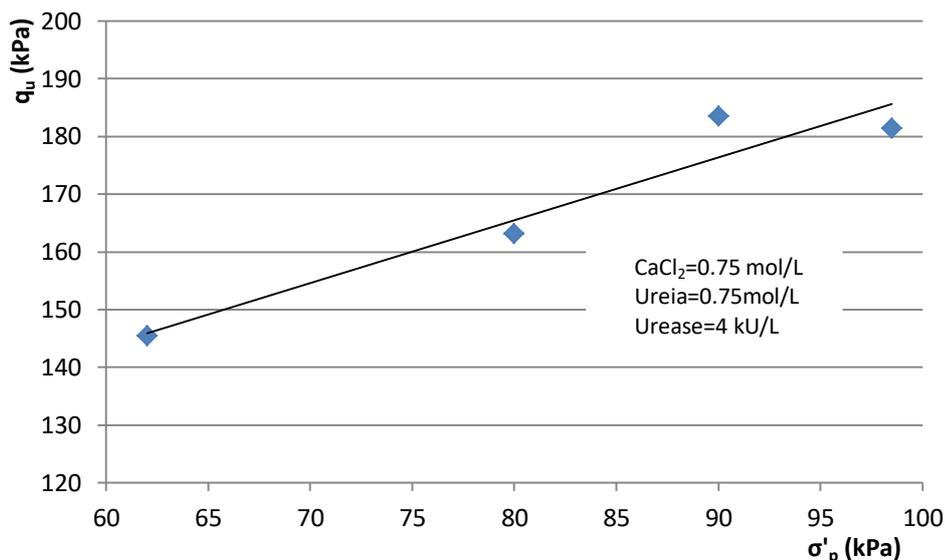


Figura 5.8 - Regressão linear entre os valores da resistência à compressão (q_u) e os valores de tensão de cedência (σ'_p) (para a solução estabilizadora base).

5.2 Efeito da variação da dosagem da solução estabilizadora

Como mencionado anteriormente, nesta secção analisa-se a relação entre a resistência à compressão, o módulo de deformabilidade, o pH, o teor do precipitado e os parâmetros de compressibilidade do solo para as diferentes concentrações dos agentes estabilizadores do solo S75/A25, mantendo constante o tempo de cura em câmara húmida (14 dias).

5.2.1 Resistência à compressão (q_u) e módulo de deformabilidade (E_{u50})

A Figura 5.9 representa a evolução das curvas tensão - extensão para as diferentes soluções estabilizadoras do solo S75/A25. De acordo com a mesma, é notório o aumento da resistência à compressão não confinada (q_u) à medida que a dosagem da solução estabilizadora aumenta.

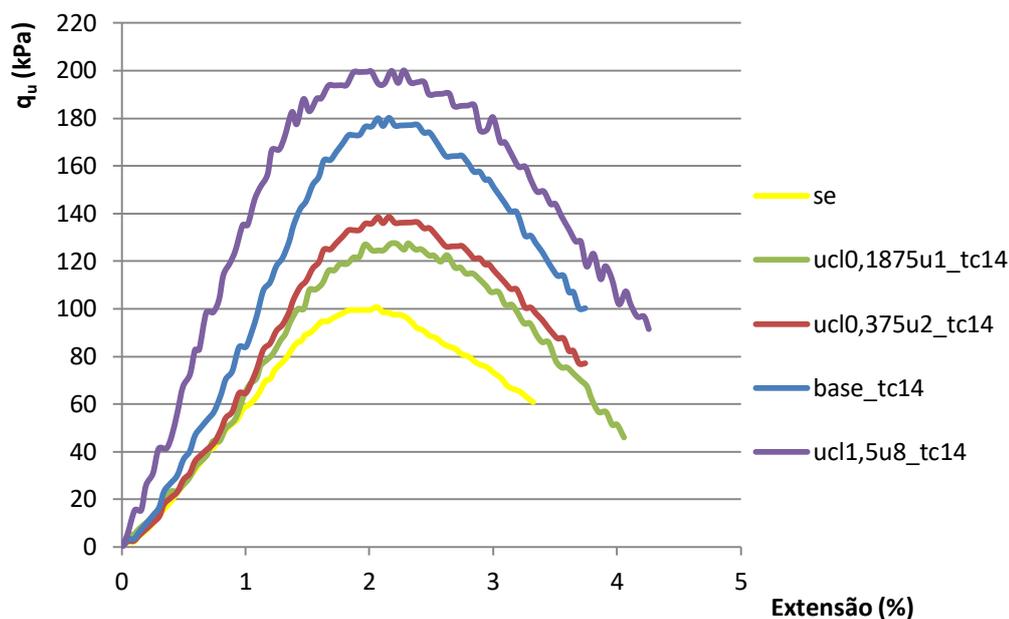
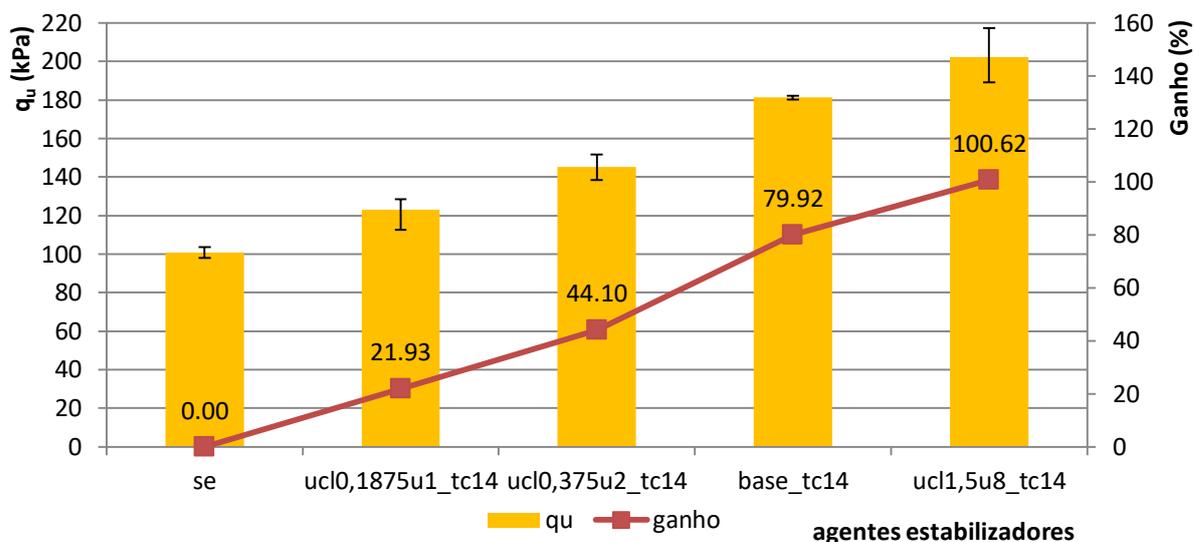
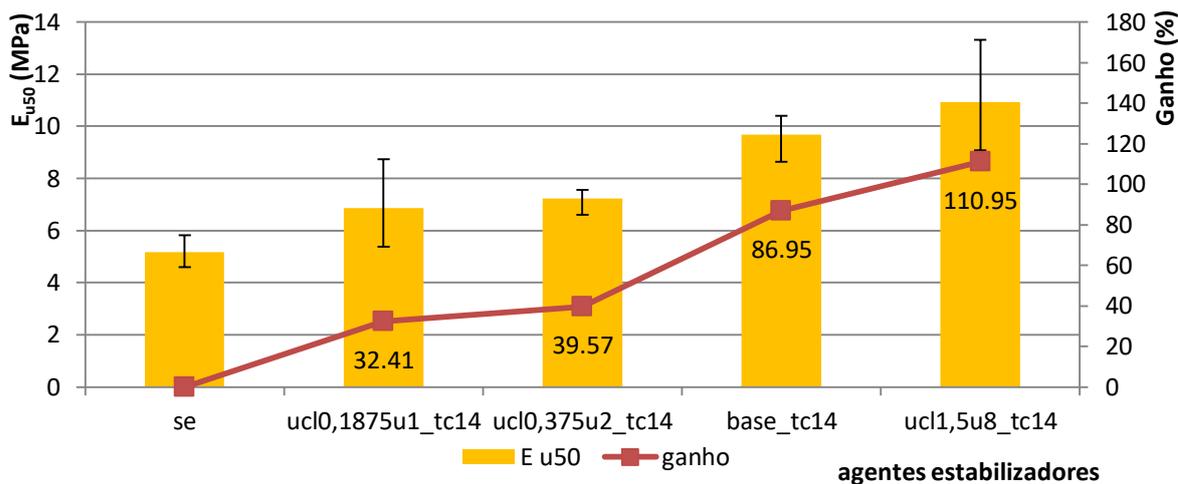


Figura 5.9 - Curvas tensão - extensão ($q_u - \epsilon_a$) para os ensaios UCS realizados sobre os provetes de solo bioestabilizados (para as diferentes soluções estabilizadoras).

A Figura 5.10 ilustra a evolução da resistência à compressão (q_u), do módulo de deformabilidade (E_{u50}) e os respectivos ganhos (quociente entre o incremento da resistência/módulo de deformabilidade do solo estabilizado e a resistência/módulo de deformabilidade do solo não estabilizado) com o aumento da dosagem da solução estabilizadora. Como referido, o processo de bioestabilização promove a melhoria das propriedades mecânicas do solo, como sugere a Figura 5.9, sendo o efeito crescente com o aumento da dosagem da solução estabilizadora. A Figura 5.10 a) mostra que todas as soluções apresentam um ganho de resistência à compressão face ao solo não estabilizado, sendo a solução estabilizadora *ucl1,5u8_tc14* que apresenta o maior ganho ($\approx 101\%$). A Figura 5.10 b) sugere que a bioestabilização induz o aumento do módulo de deformabilidade do solo quanto mais forte for a solução estabilizadora, sendo a solução estabilizadora *ucl1,5u8_tc14*, mais uma vez, a solução que apresenta o maior ganho ($\approx 111\%$). Estes resultados corroboram os dados apresentados por Freitas (2016) e Venda Oliveira et al. (2016) que estudaram estes parâmetros num solo semelhante, tendo os autores obtido valores da mesma ordem de grandeza para os parâmetros supramencionados e também registado uma evolução crescente destes com o aumento da dosagem dos agentes estabilizadores.



a)



b)

Figura 5.10 - Parâmetros mecânicos e respectivos ganhos para as diferentes soluções estabilizadoras: a) Resistência à compressão (q_u); b) Módulo de deformabilidade (E_{u50}).

5.2.2 Teor do carbonato de cálcio e pH do solo

A Figura 5.11 representa a evolução dos valores do pH e do teor de CaCO_3 para as várias soluções estabilizadoras do solo em estudo. Os resultados mostram que o pH decresce com o aumento da concentração dos reagentes e da *urease*, excepto para a solução estabilizadora *ucl0,1875u1_tc14*, que apresenta um pH superior ao solo S75/A25 sem estabilização. Esta evolução está em concordância com Freitas (2016), Venda Oliveira et al. (2016) e Carmona et al. (2018) que concluíram que para vários tipos de solo o pH decresce com o aumento da

concentração dos agentes estabilizadores, devido à produção de cloreto de amônio (ver Eq. 2.2 e Eq. 2.3). Os resultados mostram ainda que o teor de CaCO_3 aumenta com o aumento da concentração dos agentes estabilizadores (resultado este que era expectável), registando-se um aumento mais acentuado do precipitado entre a solução estabilizadora *ucl0,375u2_tc14* e a solução estabilizadora *base_tc14*.

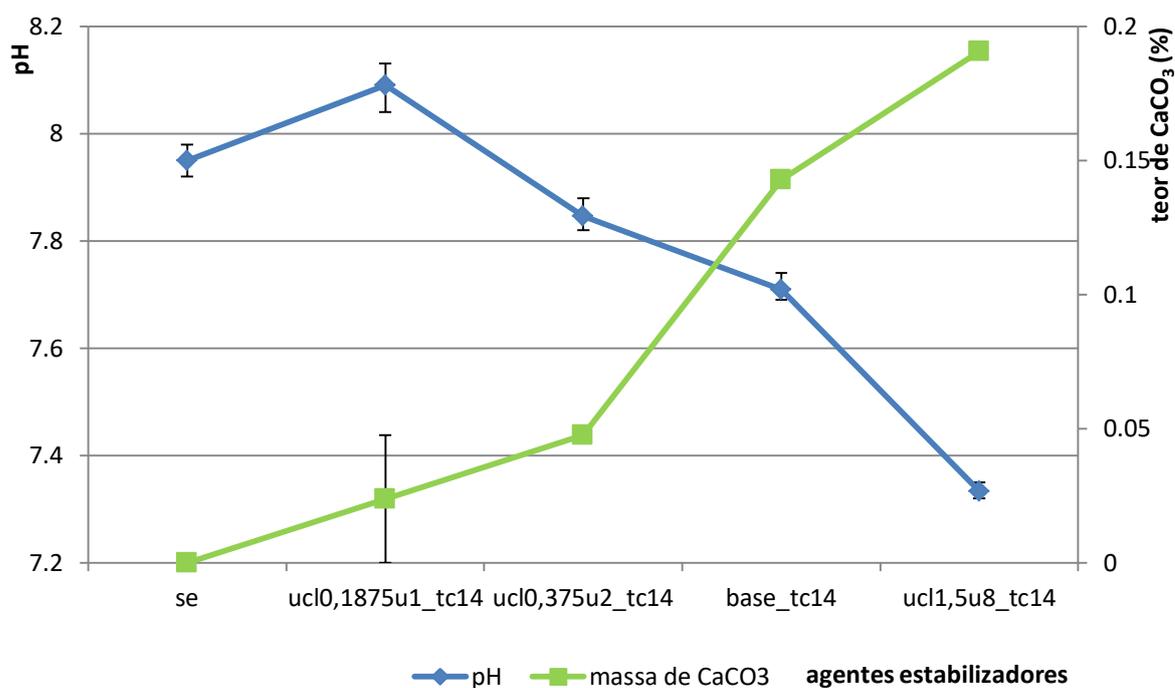
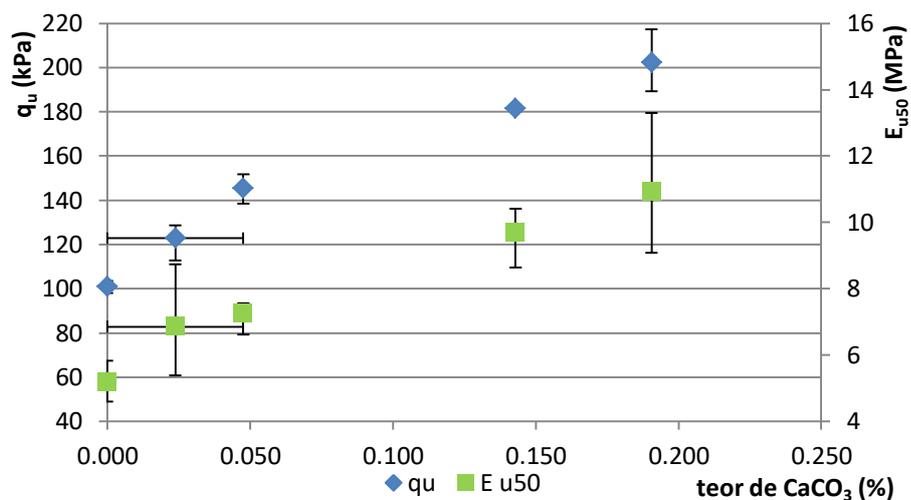
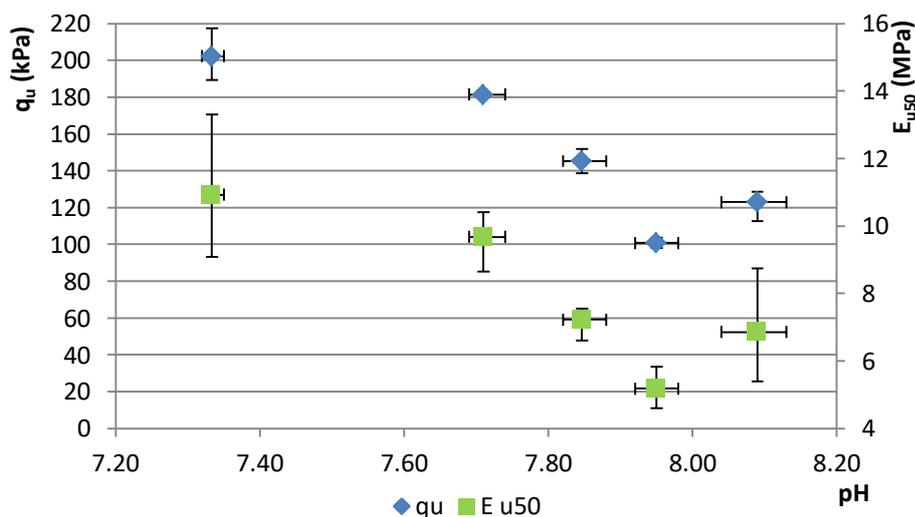


Figura 5.11 - Valores do pH e do teor de CaCO_3 para as diferentes soluções estabilizadoras.

A Figura 5.12 apresenta a relação entre a resistência à compressão e o módulo de deformabilidade com o teor de precipitado e o pH do solo bioestabilizado para as diferentes soluções estabilizadoras. A Figura 5.12 a) evidencia que os valores da resistência e do módulo de deformabilidade crescem, quase linearmente, com o aumento do teor de CaCO_3 presente no solo em estudo. A Figura 5.12 b) sugere que, tendencialmente, a resistência à compressão e o módulo de deformabilidade são mais elevados para menores valores do pH do solo bioestabilizado.



a)



b)

Figura 5.12 - Valores da resistência à compressão (q_u) e do módulo de deformabilidade (E_{u50}) para as diferentes soluções estabilizadoras: a) Em relação ao teor de CaCO_3 ; b) Em relação ao pH do solo bioestabilizado.

5.2.3 Parâmetros da compressibilidade do solo

A Figura 5.13 representa as curvas edométricas do solo em estudo bioestabilizado para as diferentes concentrações dos agentes estabilizadores. Mais uma vez, através da aplicação do método de Casagrande, explicado na secção 2.7, é estimada a tensão vertical de cedência (σ'_p), assim como são calculados os parâmetros de compressibilidade do solo, C_c e C_R , dados pelas expressões 2.7 e 2.8, respectivamente.

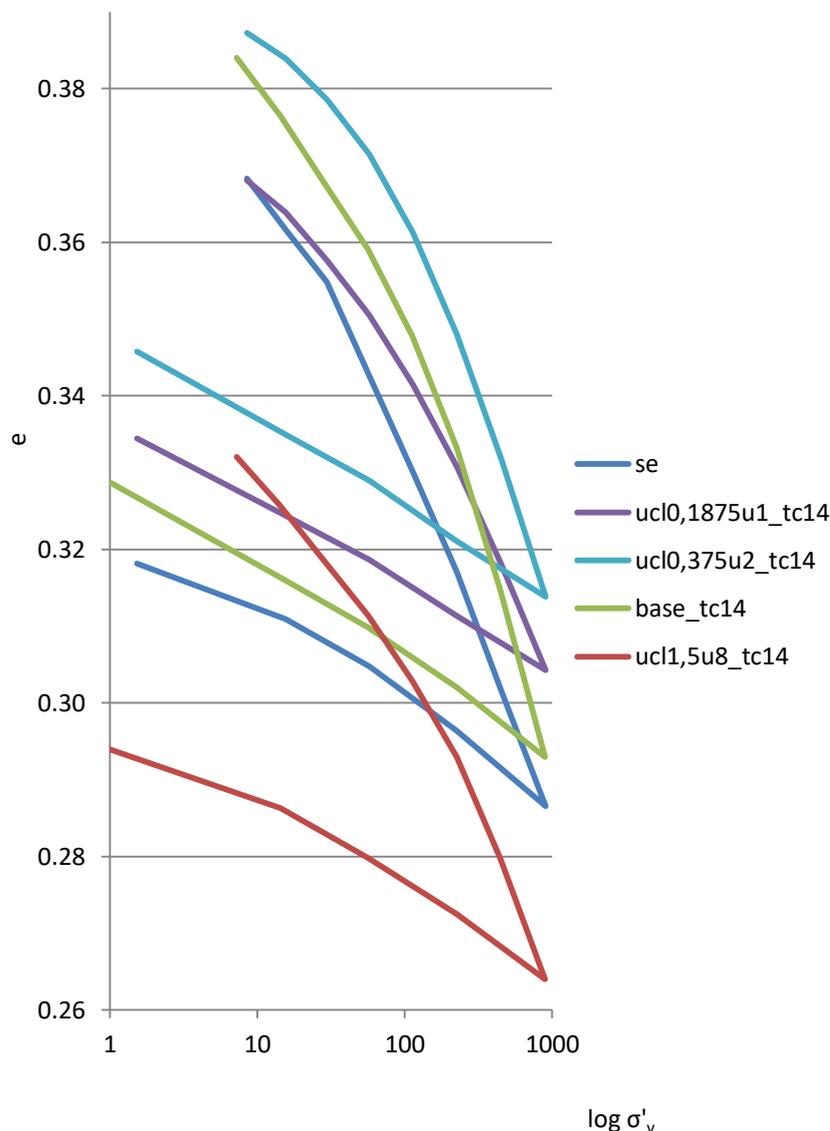


Figura 5.13 - Curvas $\log \sigma'_v - e$ para os ensaios edométricos realizados sobre os provetes de solo bioestabilizados (para as diferentes soluções estabilizadoras).

A Figura 5.14 mostra a evolução da tensão vertical de cedência, do índice de compressibilidade e do índice de recompressibilidade para as diferentes soluções estabilizadoras do solo em estudo. A Figura 5.14 a) evidencia o aumento da tensão de cedência à medida que os agentes estabilizadores apresentam uma maior concentração. A Figura 5.14 b) ilustra os valores obtidos dos parâmetros de compressibilidade do solo (C_C e C_R) para as diferentes concentrações dos agentes estabilizadores. Os resultados parecem sugerir uma evolução do índice de compressibilidade à medida que a dosagem da solução estabilizadora aumenta. O índice de recompressibilidade do solo é insensível à variação da dosagem dos agentes estabilizadores. Venda Oliveira et al. (2013) que estudaram a análise do efeito da estabilização química, utilizando cimento como ligante, sobre um solo Mole do

Baixo Mondego corroboram as conclusões obtidas para a evolução da tensão de cedência e para a evolução do índice de compressibilidade, no entanto, segundo estes, a estabilização química do solo promove o decréscimo do índice de recompressibilidade quando solicitado, o que não se verifica no presente caso.

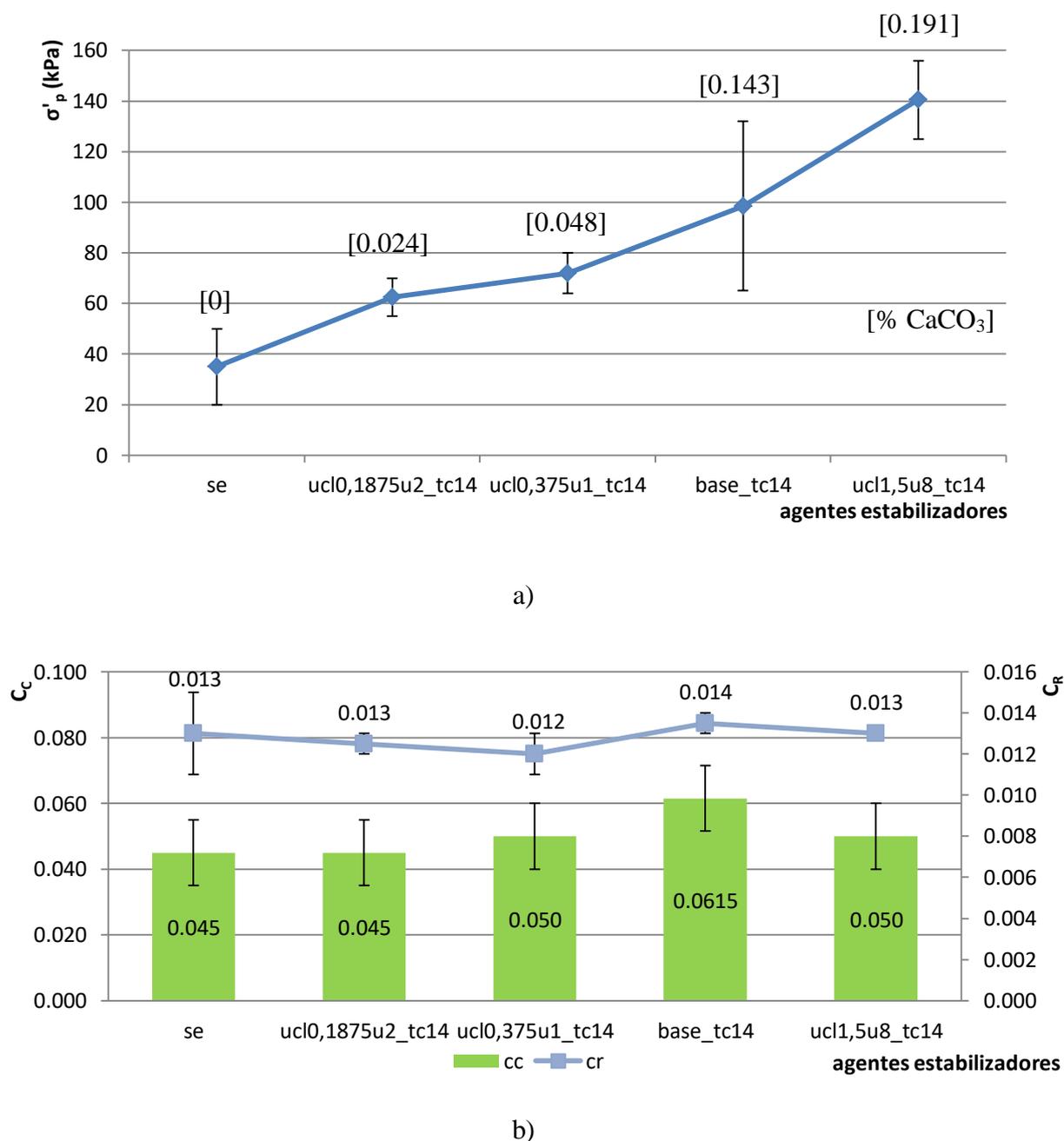


Figura 5.14 - Parâmetros medidos para as diferentes soluções estabilizadoras: a) Tensão vertical de cedência (σ'_p); b) Índice de compressibilidade (C_C) e índice de recompressibilidade (C_R).

5.2.4 Relação entre a resistência (q_u) e a tensão de cedência (σ'_p)

A Figura 5.15 apresenta a regressão linear entre os valores da resistência à compressão e os valores da tensão vertical de cedência para as diferentes soluções estabilizadoras, reflectindo o aumento destes dois parâmetros um maior grau de estabilização.

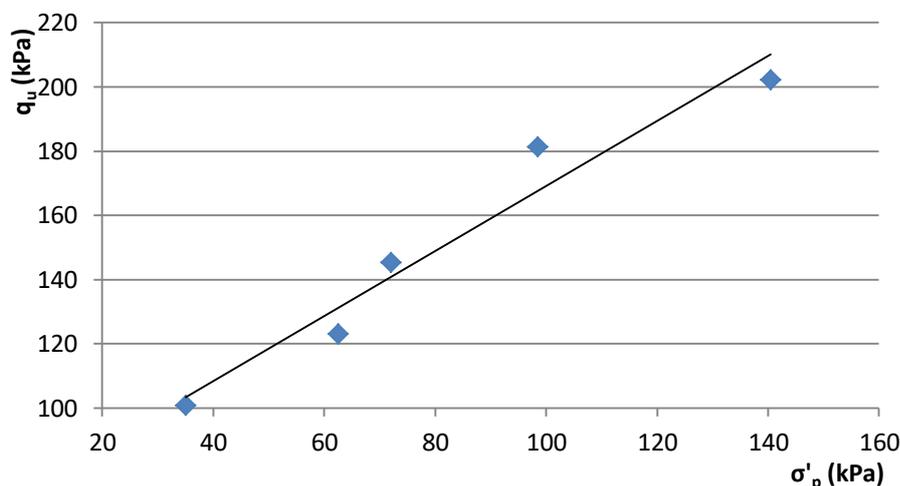


Figura 5.15 - Regressão linear entre os valores da resistência à compressão (q_u) e os valores de tensão vertical de cedência (σ'_p) (para as diferentes soluções estabilizadoras).

5.3 Ensaio XRD

A Figura 5.16 apresenta o resultado de um ensaio XRD sobre a amostra *uc11,5_tc14*. De acordo com a mesma, a amostra em estudo é composta por: micas (muscovite), quartzo, feldspato potássico e caulinite. Os fragmentos da amostra analisada não permitiram identificar a presença de calcite, não corroborando a medição do teor de CaCO_3 .

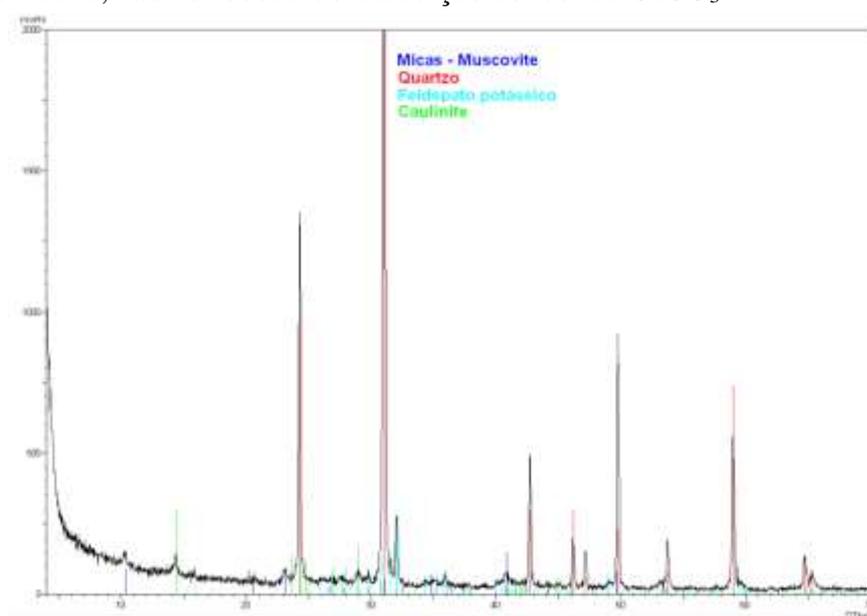
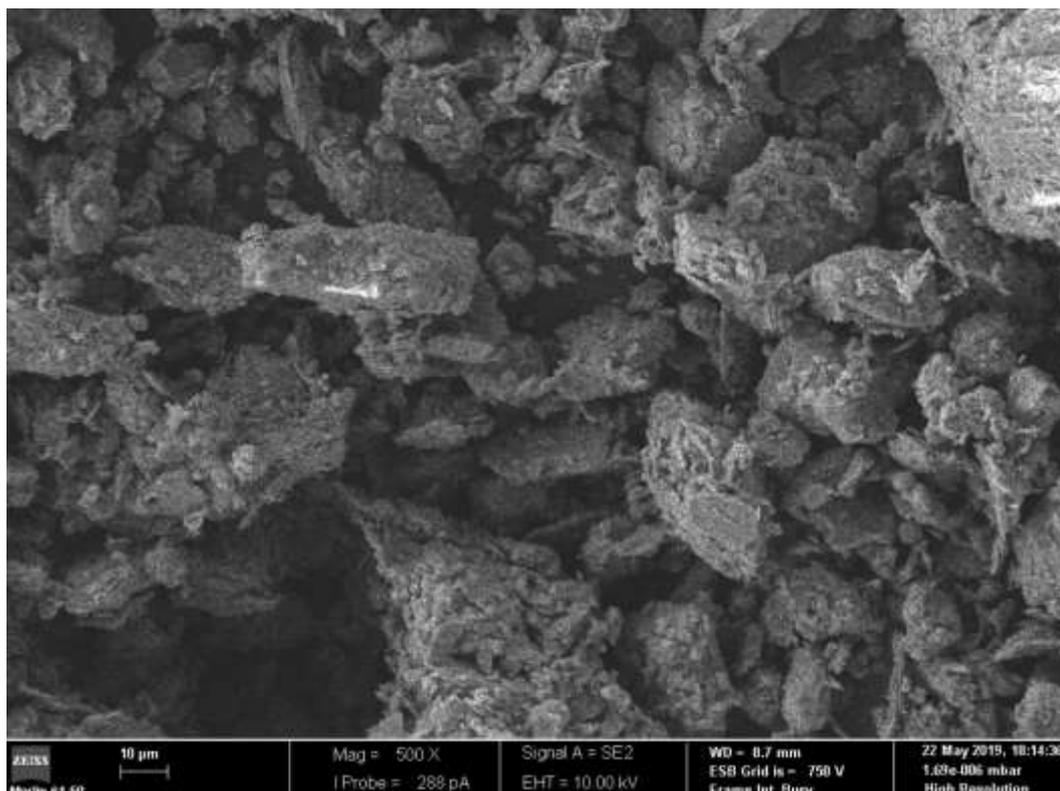


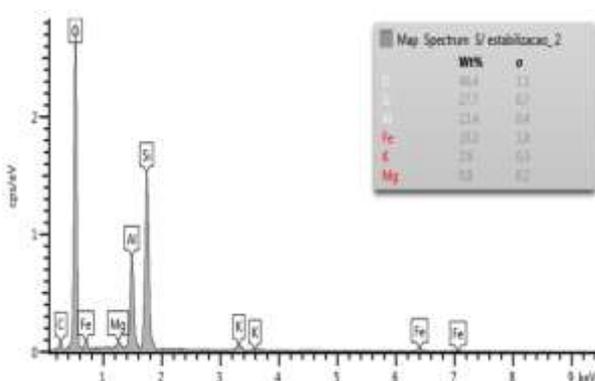
Figura 5.16 - Ensaio XRD sobre a amostra bioestabilizada *uc11,5_tc14*.

5.4 Ensaio SEM

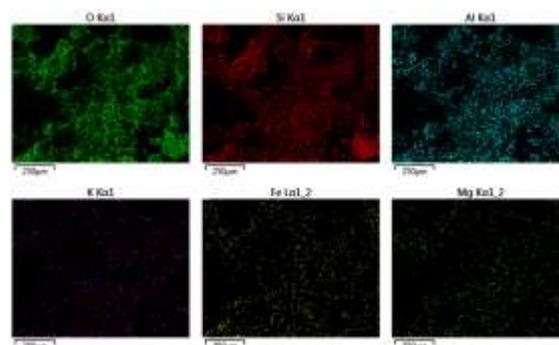
A Figura 5.17 apresenta uma imagem SEM relativa a uma amostra de um provete de solo não estabilizado. Constata-se que esta amostra de solo natural apresenta uma estrutura solta (Figura 5.17 a)) e, a sua composição química, acusou a presença de elementos químicos como: oxigénio, silício, alumínio, ferro, potássio e magnésio (Figura 5.17 b)). O mapeamento dos elementos químicos já identificados está apresentado na Figura 5.17 c).



a)



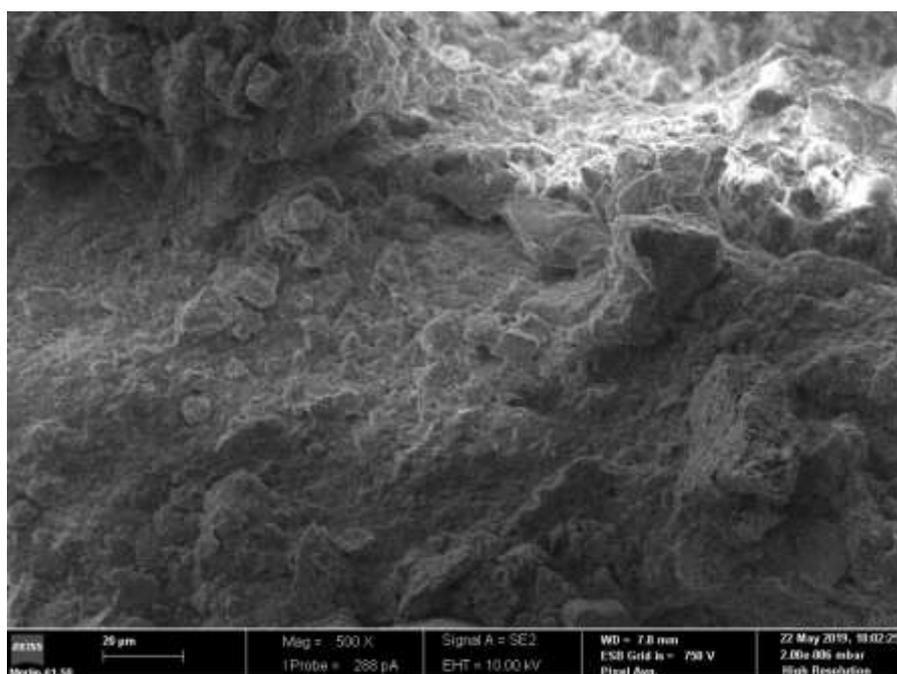
b)



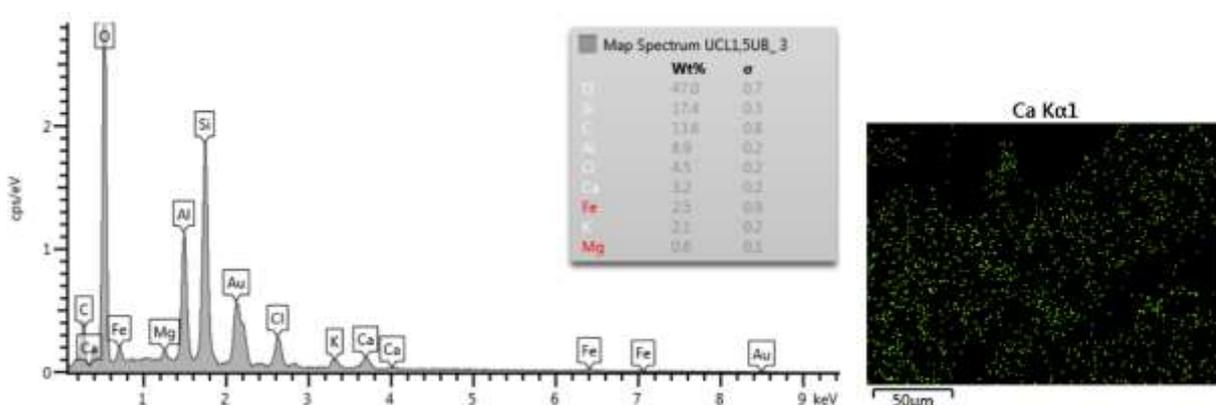
c)

Figura 5.17 - Ensaio SEM sobre uma amostra não estabilizada: a) Imagem ampliada da amostra; b) Perfil químico da amostra; c) Mapeamento da amostra.

A Figura 5.18 ilustra a imagem SEM relativa a um provete de solo bioestabilizado (*ucl1,5u8_tc14*). Os resultados sugerem que esta amostra de solo apresenta uma estrutura mais aglutinada face à estrutura da amostra de solo não estabilizado (Figura 5.18 a)). A composição química desta amostra (Figura 5.18 b)), para além dos elementos químicos presentes na amostra não estabilizada, acusou ainda a presença de carbono, cloro e cálcio. Ora, a presença do elemento cálcio sugere a presença do CaCO_3 , corroborando com as medições do teor em CaCO_3 . A Figura 5.18 c) apresenta o mapeamento químico do elemento cálcio, mostrando uma dispersão uniforme deste sobre a amostra.



a)



b)

c)

Figura 5.18 - Ensaio SEM sobre uma amostra estabilizada *ucl1,5u8_tc14*: a) Imagem ampliada da amostra; b) Perfil químico da amostra; c) Mapeamento do elemento Ca sobre a amostra.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Este subcapítulo tem como objectivo apresentar as conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, analisando, separadamente, o efeito do tempo de cura em câmara húmida e o efeito da variação da dosagem da solução estabilizadora no processo de bioestabilização do solo analisado.

A realização do trabalho laboratorial permitiu analisar o efeito do tempo de cura no solo em estudo, registando-se de seguida as principais conclusões:

- O aumento do tempo de cura em câmara húmida induz o incremento da resistência à compressão (q_u) e do módulo de deformabilidade (E_{u50}). Os resultados sugerem que a resistência à compressão evolui até aos 14 dias de cura estagnando-se até aos 28 dias. O módulo de deformabilidade regista uma evolução mais acentuada dos 14 para os 28 dias de cura.
- O pH do solo bioestabilizado e o teor de CaCO_3 registam uma evolução crescente com o aumento de tempo de cura em câmara húmida. Os resultados obtidos permitiram concluir que não houve precipitação de carbonato de cálcio após 14 dias de cura.
- Os valores da resistência à compressão (q_u) e do módulo de deformabilidade (E_{u50}) mais elevados correspondem aos maiores valores do pH e do teor de CaCO_3 do solo bioestabilizado.
- Os valores da tensão de cedência vertical (σ'_p) evoluem com o aumento de tempo de cura em câmara húmida, excepto dos 14 para os 28 dias de cura. Os resultados sugerem que os parâmetros de compressibilidade do solo, C_C e C_R , são insensíveis à variação do tempo de cura.
- A tensão de cedência aumenta de forma linear com o acréscimo da resistência à compressão não confinada.

O desenvolvimento deste trabalho permitiu ainda analisar o efeito da variação da dosagem da solução estabilizadora no solo S75/A25, apresentando-se de seguida as principais conclusões:

- Uma maior dosagem dos agentes estabilizadores (ureia, cloreto de cálcio e *urease*) induz no solo um ganho na resistência à compressão (q_u) e no módulo de deformabilidade (E_{u50}). A solução mais concentrada, com concentração equimolar de ureia-cloreto de cálcio de 1,5 mol/L e uma concentração de *urease* de 8 kU/L promove, no solo artificialmente criado, um ganho de 101% e 111% nos parâmetros q_u e E_{u50} , respectivamente, face ao solo não estabilizado.
- Uma maior concentração da solução estabilizadora promove um maior teor de CaCO_3 no solo bioestabilizado. Os resultados mostram ainda que, maioritariamente, o pH decresce com o aumento da concentração dos reagentes e da *urease*.
- Os resultados indicam que os valores da resistência à compressão e do módulo de deformabilidade são tanto mais elevados quanto maior o teor de CaCO_3 e correspondem a menores valores do pH do solo artificialmente criado.
- Os valores da tensão de cedência vertical (σ'_p) evoluem com o aumento da concentração dos agentes estabilizadores. Os resultados sugerem que o índice de recompressibilidade (C_R) do solo assume, praticamente, o mesmo valor para as diferentes soluções estabilizadores, enquanto o índice de compressibilidade do solo (C_C) parece aumentar à medida que os agentes estabilizadores apresentam maiores concentrações.
- A resistência à compressão (q_u) é tanto maior quanto maior for a tensão de cedência (σ'_p) do solo bioestabilizado, registando-se uma relação linear entre estes dois parâmetros.
- O ensaio XRD (X-Ray Diffraction) sobre os fragmentos da amostra bioestabilizada não permitiu identificar a presença de calcite, indicando unicamente a existência de: micas (muscovite), quartzo, feldspato potássico e caulinite.
- O ensaio SEM (Scanning Electron Microscops) sobre uma amostra não estabilizada indicou a presença de elementos químicos como: oxigénio, silício, alumínio, ferro, potássio e magnésio. O ensaio SEM sobre uma amostra bioestabilizada, para além dos elementos químicos presentes na amostra não estabilizada, permitiu também identificar a presença de carbono, cloro e cálcio. O mapeamento do elemento químico cálcio mostrou uma dispersão uniforme e sugere a presença de calcite, corroborando com as medições do teor em CaCO_3 . As imagens ampliadas sugerem ainda uma estrutura mais aglutinada para a amostra estabilizada face à estrutura da amostra de solo não estabilizada.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

De realçar que o processo de bioestabilização por via enzimática é uma técnica de melhoramento de solos relativamente recente, pelo que, é necessário mais investigações nesta área a fim de a tornar um processo exequível e uma ferramenta prática e amiga do ambiente. Com o objectivo de detalhar e ampliar o conhecimento da técnica de bioestabilização aplicada a solos, segue-se uma lista contendo algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Aplicação do mesmo estudo para outros tipos de solos, como por exemplo, solos argilosos e solos orgânicos.
- Comparação com outras técnicas de bioestabilização, como por exemplo, o uso de biopolímeros.
- Aplicação e estudo da técnica de precipitação de carbonato de cálcio por via enzimática a um caso real.
- Modelação numérica do solo c/ estabilização vs solo s/ estabilização.
- Realização de ensaio triaxiais drenados e não drenados sobre amostras bioestabilizadas.
- Análise custo/benefício para a técnica de precipitação de carbonato de cálcio por via enzimática.
- Impacte ambiental da técnica de precipitação de carbonato de cálcio por via enzimática em diferentes solos.
- Comparação do processo de bioestabilização por via enzimática c/ a via bacteriana.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Thawadi, S.M. (2011). "Ureolytic bacteria and calcium carbonate formation as a mechanism of strength enhancement of sand." *J. Adv. Sci. Eng. Res.*, 1(1): 98–114.
- ASTM D 2166 (2000). "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil." American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 2487 (1998). "Standard classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)". American Society for Testing and Materials.
- Bruntland, G. (1987). "Our Common Future. Report of the World Commission on Environment and Development". Oxford University Press, Oxford.
- BS 1377-3 (1990). "Methods of test for soil for Civil engineering purposes – part 3: chemical and electro-chemical tests". British Standards Institution, London.
- BS 1377-5 (1990). "Methods of test for soils for civil engineering purposes – part 5: Compressibility, permeability and durability tests". British Standards Institution, London.
- BS 1377-7 (1990). "Methods of test for soils for civil engineering purposes – part 7: Shear strength tests (total stress)". British Standards Institution, London.
- Burbank, M., Weaver, T., Lewis, R., Williams, T., Williams, B., and Crawford, R. (2013). "Geotechnical tests of sands following bioinduced calcite precipitation catalyzed by indigenous bacteria". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, 139(6): 928-936.
- Cardoso, A.S. (1987). "A técnica das pregagens em solos aplicada em escavações – métodos de análise e dimensionamento". Tese de Doutoramento, FEUP, Porto.
- Carmona, J.P.S.F (2016). "Utilização da biotecnologia para a estabilização de solos: Precipitação de CaCO_3 por via enzimática.". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Carmona, J.P.S.F.; Venda Oliveira, P.J.; Lemos, L.J.L.; Pedro, A.M.G. (2018). "Improvement of a sandy soil by enzymatic CaCO_3 precipitation". *ICE – Geotechnical Engineering*, Vol.171 (GE1): 3-15. [<https://doi.org/10.1680/jgeen.16.00138>].
- Chang, R. (2005). "Química". McGraw-Hill, 8ª edição.
- Chou, C.W., Seagren E.A., Aydilek A.H., and Lai, M. (2011). "Biocalcification of sand through ureolysis". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, 137(12): 1179-1189.
- Coelho, P.A.L.F. (2000). "Caracterização geotécnica de solos moles. Estudo do local experimental da Quinta do Foja (Baixo Mondego)". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Correia, A.A.S., Venda Oliveira, P.J. e Lemos, L.J.L. (2008). "Solo estabilizado pela técnica de deep mixing – Preparação Laboratorial de Amostras". 11º Congresso Nacional de Geotecnia, Coimbra, Vol. III: 335-342.

- Costa, J. N. P. (2012). “Estabilização de solos por via química e biológica”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- DeJong, J.T., Mortensen, B. M., Martinez, B.C., and Nelson D.C. (2010). “Bio-mediated soil improvement”. *Ecological Engineering*, 36: 196-210.
- DeJong, J.T., Soga, K., Kavazanjian, E., Burns, S., van Paassen, L.A., Al Qabany, A., Aydilek, A., Bang, S.S., Burbank, M., Caslake, L.F., Chen, C.Y., Cheng, X., Chu, J., Ciurli, S., Esnault-Filet, A., Fauriel, S., Hamdan, N., Hata, T., Inagaki, Y., Jefferis, S., Kuo, M., Laloui, L., Larrahondo, J., Manning, D.A.C., Martinez, B., Montoya, B.M., Nelson, D. C., Palomino, A., Renforth, P., Santamarina, J.C., Seagren, E.A., Tanyu, B., Tsesarsky, M., Weaver, T. (2013) “Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, oportunities and challenges”. *Géotechnique* 63(4): 287-301.
- E 196 (1966). “Solos – Análise Granulométrica”. Especificações do LNEC, Lisboa, Portugal.
- E 197 (1966). “Solos – Ensaio de compactação”. Especificação do LNEC, Lisboa, Portugal.
- E219 (1968). “Prospecção geotécnica de terrenos - vocabulário”. Especificação do LNEC, Lisboa, Portugal.
- EN 14679 (2005). “Execution of special geotechnical works – Deep mixing”. CEN, English version, April of 2005, p. 52.
- Eurosoilstab (2001). “Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils. Design guide soft soil stabilization”. CT97-0351, EC Project No. BE 96-3177, Industrial & Materials Technologies Programme (BriteEuRam III), European Commission, p. 94.
- Freitas, L.D. (2016). “Utilização da biotecnologia para a estabilização de solos: Precipitação de CaCO_3 por via enzimática. Influência do tipo de solo”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Head, K.H. (1982). “Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests”. Pentech Press Limited. Plymouth, London
- Lambe, T.W.; Whitman, R.V. (1979). “Soil Mechanics, SI Version”. Jhon Wiley & Sons, New York.
- Massarsch, K.; and Topolnicki, M. (2005). “Regional Report: European Practice of Soil Mixing Technology”. International Conference on Deep Mixing. Best Practice and Recent Advances. Stockholm, Sweden.
- Matos Fernandes, M. (2011). “Mecânica dos solos Conceitos e Princípios Fundamentais, Volume 1”. FEUP Edições, 1ª edição.
- Nemati, M., Voordouw, G. (2003). “Modification of porous media permeability, using calcium carbonate produced enzymatically in situ”. *Enzyme and Microbial Technology* 33: 635-642.
- Neupane, D., Yasuhara, H., Kinoshita, N., and Unno, T. (2013). “Applicability of enzymatic calcium carbonate precipitation as a soil-strengthening technique”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, 139(12): 2201-2211.
- Neupane, D.; Yashuara,H.; Kinoshita,N.; Ando,Y. (2015). “Distribution of mineralized carboonate and its quantification method in enzyme mediated calcite precipitation technique”. *Soils and Foundations*, 55(2): 447-457.
- NP 143 (1969). “Solos - Determinação dos limites de consistência”. Norma Portuguesa Definitiva.
- NP 83 (1965). “Solos – Determinação da densidade das partículas sólidas”. Norma Portuguesa Definitiva.
- NP-84 (1965). “Solos – Determinação do teor em água”. Norma Portuguesa Definitiva.

- Torgal, F. P. e Jalali, S. (2010). “A Sustentabilidade dos Materiais de Construção”. TecMinho, 1ª edição.
- Torgal, F. P., Labrincha, J.A., Diamanti, M. V., Yu, C. – P., Lee, H. K. (2015). “Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering”. Springer International Publishing, Switzerland.
- TRIAX [Software]. Durham, University of Durham, School of Engineer, England.
- Van Paassen, L. A., (2009). “Biogrout. Ground Improvement by Microbially Induced Carbonate Precipitation”. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. Delft University of Technology, Netherlands.
- Venda Oliveira, P.J.; Correia, A.A.S.; and Garcia, M.R. (2013). “Effect of Stress Level and Binder Composition on Secondary”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139(5): 810-820.
- Venda Oliveira, P.J.; Freitas, L.D.; Carmona J.P.S.F (2016). “Effect of soil type on the enzymatic Calcium Carbonate precipitation process used for soil improvement”. Journal of Materials in Civil Engineering, 29(4): 04016263.
- Yasuhara, H., Neupane, D., Hayashi, K., Okamura, M. (2012). “Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymetically induced carbonate precipitation”. Soils Foundations, 52(3): 539-549.

ANEXO A

Quadro A. 1 - Tratamento da fracção grossa do solo em estudo.

N.º do peneiro	Malha (mm)	Peso do material retido (g)	% do material retido	% acumulada de retidos	% acumulada de passados
20	0.850	2.300	3.28	3.28	96.72
40	0.425	5.990	8.53	11.80	88.20
60	0.250	13.456	19.16	30.97	69.03
100	0.150	19.260	27.43	58.39	41.61
200	0.075	8.092	11.52	69.91	30.09

Quadro A.2 - Diâmetros das partículas na sedimentação do solo em estudo.

t (min)	Leitura no Densímetro L_s	T (°C)	Leitura corrigida L_c	Z_s (cm)	K	D (mm)	% de passados
1	1.0100	28.0	1.0072	14.6779	0.01248	0.0478	16.46
2	1.0100	28.0	1.0072	14.6779	0.01248	0.0338	16.46
5	1.0090	28.0	1.0062	14.9456	0.01248	0.0216	14.17
10	1.0090	26.0	1.0057	15.0795	0.01276	0.0128	13.02
30	1.0080	30.0	1.0057	15.0795	0.01221	0.0087	13.02
60	1.0080	25.5	1.0045	15.3873	0.01283	0.0065	10.38
240	1.0070	24.0	1.0032	15.7487	0.01305	0.0033	7.29
1440	1.0065	24.0	1.0027	15.8826	0.01305	0.0014	6.14
2880	1.0065	24.0	1.0027	15.8826	0.01305	0.0010	6.14

Antifloculante: 100 cm³ de solução de hezametafosfato de sódio ; Correção do antifloculante, $C_a=0.004120$; Correção do menisco, $C_m=0.0005$; Densidade das partículas, $G=2.65$.

Quadro A.3 - Determinação da densidade das partículas do solo em estudo.

N.º do picnómetro	86	91	95
Picnómetro (g) (m1)	35.782	36.397	36.265
Picn. + água (g) (m2)	132.860	133.013	132.923
Picn. + solo seco (g) (m4)	68.475	69.011	68.974
Picn. + água + solo (g) (m5)	153.260	153.265	153.354
Solo (g)	32.693	32.614	32.709
G	2.656	2.634	2.659
$G_{\text{médio}}$	2.65		

ANEXO B

Marcha de cáculo do número de pancadas necessárias  compactação dos provetes de solo:

1 - Calcular a energia de compactação usada no ensaio de Proctor Leve:

$$V_{\text{molde Proctor}} = 956,86 \text{ cm}^3$$

$$m_{\text{pilão}} = 2487,5 \text{ gr}$$

$$h_{\text{queda}} = 30,30 \text{ cm}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Energia por pancada no ensaio Proctor} = E_{\text{potencial}} = m \times g \times h$$

$$E_{\text{potencial}} = m \times g \times h = 2487,5 \times 10^{-3} \times 9,81 \times 30,30 \times 10^{-2} = 7,39 \text{ N.m}$$

$$\text{N de pancadas total no ensaio Proctor} = n_{\text{pancadas}} = 75 \text{ pancadas}$$

$$E_{\text{comp. Proctor}} = n \times E = 75 \times 7,39 = 554,25 \text{ N.m}$$

2 - Determinar o número de pancadas necessárias  compactação dos provetes de solo a usar no ensaio UCS e no ensaio edométrico através de uma regra de 3 simples:

Características dos provetes de solo do ensaio UCS:

$$h = 76 \text{ mm}; D = 38 \text{ mm}$$

$$V_{\text{prov UCS}} = A \times h = \pi \times \left(\frac{38}{2}\right)^2 \times 76 = 86,19 \text{ cm}^3$$

Regra de três simples relacionando os volumes e a energia de compactação:

$$V_{\text{molde Proctor}} \text{ ----- } E_{\text{com. Proctor}}$$

$$V_{\text{prov UCS}} \text{ ----- } E_{\text{comp. UCS}}$$

$$E_{\text{comp. UCS}} = \frac{86,19 \times 554,25}{956,86} = 49,92 \text{ N}$$

Utilizando o mesmo pilão, a energia de compactação por pancada no ensaio UCS é igual  energia de compactação por pancada no ensaio Proctor, ou seja:

Energia por pancada no ensaio UCS = $E_{\text{potencial}} = 7,39 \text{ N. m}$

$$n_{\text{pancadas}} = \frac{E_{\text{comp. UCS}}}{E_{\text{potencial}}} = \frac{49,92}{7,39} \approx 7 \text{ pancadas} = (2 + 2 + 3) \text{ pancadas}$$

Características dos provetes de solo do ensaio edométrico:

$h = 140 \text{ mm}; D = 70 \text{ mm}$

$$V_{\text{prov edométrico}} = A \times h = \pi \times \left(\frac{70}{2}\right)^2 \times 140 = 538,78 \text{ cm}^3$$

Regra de três simples relacionando os volumes e a energia de compactação:

$$V_{\text{molde Proctor}} \text{ ----- } E_{\text{com. Proctor}}$$

$$V_{\text{prov edométrico}} \text{ ----- } E_{\text{comp. edométrico}}$$

$$E_{\text{comp. edométrico}} = \frac{538,78 \times 554,25}{956,86} = 312,08 \text{ N. m}$$

Mais uma vez, utilizando o mesmo pilão, a energia de compactação por pancada no ensaio edométrico é igual à energia de compactação por pancada no ensaio Proctor, ou seja:

Energia por pancada no ensaio edométrico = $E_{\text{potencial}} = 7,39 \text{ N. m}$

$$n_{\text{pancadas}} = \frac{E_{\text{comp. UCS}}}{E_{\text{potencial}}} = \frac{312,08}{7,39} \approx 42 \text{ pancadas} = (14 + 14 + 14) \text{ pancadas}$$

Quadro B.1 - Quantidades de cloreto de cálcio, ureia e *urease* necessárias para preparar 1,5 kg de solo (g).

Designação da solução estabilizadora	Agentes estabilizadores		
	CaCl ₂ (g)	Ureia (g)	<i>Urease</i> (g)
se	0	0	0
ucl0,1875u1	3.43365	1.85831	0.00481
ucl0,375u2	6.86730	3.71663	0.00962
base	13.73460	7.43325	0.01924
ucl1,5u8	27.46920	14.86650	0.03847

ANEXO C

Quadro C.1 - Resumo da resistência à compressão (q_u) e do módulo de deformabilidade (E_{u50}) para todos os ensaios UCS realizados.

Designação do ensaio	Resultados UCS					
	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
	q_u (kPa)	E_{u50} (kPa)	q_u (kPa)	E_{u50} (kPa)	q_u (kPa)	E_{u50} (kPa)
se	100.76	5827.80	98.17	5110.24	103.50	4596.47
ucl0,1875u1_tc14	112.73	5389.75	127.49	6440.52	128.55	8739.69
ucl0,375u2_tc14	138.62	6614.25	145.32	7506.74	151.89	7561.28
base_tc3	141.15	7124.76	143.65	6454.57	151.52	8585.10
base_tc7	166.40	12104.43	169.10	8638.81	153.83	7978.63
base_tc14	180.20	8645.08	181.65	10405.55	182.29	9991.07
base_tc28	185.62	116672.27	167.47	14031.73	197.40	17165.19
ucl1,5u8_tc14	189.21	9083.09	217.40	10379.95	200.13	13307.71

Quadro C.2 - Resumo dos teores de água determinados após os ensaios UCS.

Designação do ensaio	Teor de água após UCS					
	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
	W_1 (%)	W_2 (%)	W_1 (%)	W_2 (%)	W_1 (%)	W_2 (%)
se	10.08	9.81	10.07	10.11	10.17	9.94
ucl0,1875u1_tc14	9.63	9.72	9.77	9.89	9.65	9.84
ucl0,375u2_tc14	10.14	10.11	9.96	10.18	10.04	9.98
base_tc3	9.68	9.59	9.29	9.28	9.25	9.24
base_tc7	10.28	10.23	10.00	10.04	9.93	10.06
base_tc14	9.76	9.79	9.70	9.69	9.53	9.68
base_tc28	9.59	9.37	9.39	9.57	9.61	9.58
ucl1,5u8_tc14	9.59	9.65	9.74	10.67	9.53	9.50

Quadro C.3 - Resumo dos valores de pH medidos após os ensaios UCS.

Designação do ensaio	pH após ensaio UCS		
	Provete 1	Provete 2	Provete 3
se	7.92	7.95	7.98
ucl0,1875u1_tc14	8.10	8.04	8.13
ucl0,375u2_tc14	7.82	7.84	7.88
base_tc3	7.42	7.46	7.38
base_tc7	7.64	7.62	7.58
base_tc14	7.69	7.74	7.70
base_tc28	7.79	7.79	7.82
ucl1,5u8_tc14	7.35	7.33	7.32

Quadro C.4 - Resumo dos teores de CaCO_3 medidos após os ensaios UCS.

Designação do ensaio	Medição do teor de CaCO_3 (%)					
	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 1	Ponto 2
se	0	0	0	0	0	0
ucl0,1875u1_tc14	0	0.048	0.048	0	0.048	0
ucl0,375u2_tc14	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048
base_tc3	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095
base_tc7	0.095	0.095	0.095	0.095	0.143	0.095
base_tc14	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143
base_tc28	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143
ucl1,5u8_tc14	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191

Quadro C.5 - Resumo dos valores da tensão de cedência (σ'_p), do índice de compressibilidade (C_C) e do índice de recompressibilidade (C_R) obtidos através dos ensaios edométricos realizados.

Designação do ensaio	Resultados dos ensaios edométricos					
	Provete 1			Provete 2		
	σ'_p (kPa)	C_C	C_R	σ'_p (kPa)	C_C	C_R
se	50	0.057	0.015	20	0.033	0.011
ucl0,1875u1_tc14	55	0.045	0.013	70	0.045	0.012
ucl0,375u2_tc14	80	0.057	0.013	64	0.043	0.011
base_tc3	70	0.058	0.011	54	0.060	0.012
base_tc7	90	0.047	0.013	70	0.050	0.012
base_tc14	65	0.057	0.013	132	0.066	0.014
base_tc28	90	0.052	0.012	90	0.043	0.011
ucl1,5u8_tc14	125	0.052	0.013	156	0.048	0.013

Quadro C.6 - Resumo dos teores em água dos provetes a ensaiar no ensaio edométrico.

Designação do ensaio	Controlo do teor em água (ensaio edométrico)			
	Provete 1		Provete 2	
	W_1 (%)	W_2 (%)	W_1 (%)	W_2 (%)
se	9.53	9.78	9.89	9.94
ucl0,1875u1_tc14	10.04	10.01	9.80	9.86
ucl0,375u2_tc14	10.47	9.97	10.58	10.61
base_tc3	9.90	10.00	9.47	8.29
base_tc7	10.08	9.65	9.95	9.55
base_tc14	10.41	10.19	10.33	10.18
base_tc28	9.80	10.00	9.60	10.18
ucl1,5u8_tc14	9.38	9.35	9.68	9.65