



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Diogo José Rebelo Cabral

ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO COM
RECURSO A BIOPOLÍMEROS:
EFEITO DA DOSAGEM E DO TEMPO DE CURA

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 da Universidade de Coimbra.

Fevereiro de 2020

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Diogo José Rebelo Cabral

Estabilização de um solo com recurso a biopolímeros: efeito da dosagem e do tempo de cura

**Stabilization of a soil through the use of biopolymers: effect of the content
and the curing time**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Geotecnia,
orientada pelo Professor Doutor Paulo José da Venda Oliveira

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.

Fevereiro de 2020



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Após a conclusão deste trabalho, deixo um sincero agradecimento a todos os que contribuíram directa ou indirectamente para a sua realização:

A todo o corpo docente da área de Geotecnia pelos conhecimentos transmitidos ao longo do curso, fundamentais para a concretização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Paulo José da Venda Oliveira pela orientação e apoio prestado no decorrer da escrita da dissertação.

Ao Professor Doutor António Alberto Santos Correia pelo auxílio prestado na conversão dos dados retirados do ensaio edométrico para o ficheiro Excel.

Ao Sr. José António, técnico do laboratório de Geotecnia do DEC-FCTUC, pelo seu apoio prestado e total disponibilidade na componente laboratorial.

Aos meus amigos e colegas de curso, principalmente ao Joaquim Rosa, Manuel Santos e Pedro Martins por todo o apoio e incentivo manifestado durante a realização desta dissertação e pelos bons momentos passados durante todo o percurso académico.

Ao Engenheiro Carlos Patacas pela realização do ensaio SEM e pelo esclarecimento de todo o seu procedimento.

À minha família, em especial, aos meus pais e à minha irmã por possibilitarem esta oportunidade e pela motivação dada.

RESUMO

Na área da Engenharia Civil, mais concretamente no ramo da geotecnia, a procura e o estudo de técnicas sustentáveis tem vindo a aumentar, visando substituir técnicas que afectam negativamente o ambiente. Neste contexto, o presente trabalho pretende contribuir para a afirmação de técnicas amigas do ambiente como a bioestabilização com recurso ao Xantano, analisando o efeito do tempo de cura e da dosagem do biopolímero no comportamento em condições confinadas e não confinadas.

Inicialmente, de modo a classificar o solo efectuou-se a sua caracterização geotécnica, tendo sido necessário avaliar vários parâmetros, tais como: a sua composição granulométrica, os limites de consistência, a densidade das partículas do solo, o teor de água óptimo e peso volumico seco máximo obtido do Ensaio Proctor e o valor do pH do solo natural.

Numa fase posterior, procedeu-se à determinação da resistência à compressão não confinada e ao módulo de deformabilidade através de ensaios UCS, bem como as medições dos valores do pH e dos teores de humidade dos provetes bioestabilizados. Para o estudo da compressibilidade do solo em condições confinadas, recorreu-se a ensaios edométricos para analisar o índice de compressibilidade, o índice de recompressibilidade/ expansibilidade, a tensão de cedência e também o coeficiente de consolidação. Complementarmente, realizaram-se ensaios SEM (Scanning Electron Microscops) com o intuito de analisar o efeito do Xantano na estrutura do solo estabilizado.

Após a conclusão do presente trabalho, verificou-se que o processo de bioestabilização no solo em estudo proporciona, de maneira geral, um melhoramento da resistência. Por outro lado, não parece ter efeitos benéficos na compressibilidade do solo.

Palavras-chave: Biotecnologia, Bioestabilização, Biopolímeros, Xantano, pH, Ensaio UCS, Ensaio edométrico, SEM, Resistência, Deformabilidade.

ABSTRACT

In the Civil Engineering area, more concretely in the geotechnical branch, the search and studies of sustainable techniques has been increasing, aiming to replace the techniques that affect the ambient negatively. In this context, the current work intends to contribute to the affirmation of techniques environmentally friendly as the biostabilization through the use of Xanthan Gum, analyzing the effect of the curing time and the content of the biopolymer on the behavior in confined and not confined conditions.

Initially, to classify the soil was made its geotechnical characterization, and for that was evaluated several parameters, such as: the size granulometric distribution, the consistency limits, the soil particle density, the optimum water content and the maximum volumetric weight calculated by the Proctor Test, and the pH value of the natural soil.

In the next phase of this work, it was evaluated the unconfined compression strength and the deformability modulus by using UCS tests, as well as the values of the pH and the water content of the biostabilized samples. To study the compressibility of the soil in confined conditions, it was done an oedometer test to evaluate the compression index, recompression/swelling index, yield stress and also the coefficient of consolidation. Complemently, SEM Tests were made in order to analyze the effect of Xanthan Gum in the structure of the stabilized soil.

After the conclusion of the current work, it was found that the process of biostabilization in the soil in study provides, in general, an improvement of the resistance. On the other hand, it doesn't seem to have a benefic effect on the soil compressibility.

Keywords: Biotechnology, Biostabilization, Biopolymers, Xanthan Gum, pH, Unconfined compression test, Eodometer test, SEM, Strength, Deformability.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	ix
SIMBOLOGÍA	x
ABREVIATURAS	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento geral.....	1
1.2 Estrutura da dissertação	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Biotecnologia aplicada. Desenvolvimento sustentável	3
2.2 Bioestabilização através do uso de biopolímeros.....	4
2.3 Bioestabilização através do uso de Xantano.....	6
2.4 Compressibilidade e consolidação primária	13
3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	18
3.1 Introdução.....	18
3.2 Composição granulométrica	19
3.3 Limites de consistência.....	19
3.4 Densidade das partículas do solo.....	20
3.5 Ensaio Proctor	20
3.6 Medição do valor do pH	20
3.7 Classificação unificada do solo	21
4 PROCEDIMENTO LABORATORIAL.....	22
4.1 Introdução.....	22
4.2 Preparação dos provetes de solo.....	22
4.2.1 Materiais e equipamentos utilizados	22
4.2.2 Descrição da preparação	23
4.2.3 Método de mistura do agente bioestabilizador	24
4.2.4 Compactação dos provetes	25
4.3 Ensaio de compressão simples não confinada (UCS)	27
4.3.1 Descrição do equipamento.....	27
4.3.2 Descrição do ensaio UCS	28

4.3.3 Tratamento de dados.....	30
4.4 Ensaio edométrico	31
4.4.1 Descrição do equipamento.....	32
4.4.2 Descrição da montagem da amostra	33
4.4.3 Descrição do ensaio edométrico (consolidação)	35
4.5 Medição do teor de humidade dos provetes dos ensaios UCS	35
4.6 Medição do teor de humidade dos provetes dos ensaios edométricos	36
4.7 Medição do valor do pH dos provetes bioestabilizados após o ensaio UCS.....	36
4.8 Ensaio SEM (Scanning Electron Microscopes).....	36
4.9 Plano de ensaios	37
5 DISCUSSÃO E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS.....	39
5.1 Efeito da variação do tempo de cura em câmara húmida	39
5.1.1 Resistência à compressão (q_u) e módulo de deformabilidade (E_{u50})	39
5.1.2 Valores do pH do solo bioestabilizado	41
5.1.3 Parâmetros da compressibilidade do solo.....	42
5.1.4 Coeficiente de consolidação	45
5.1.5 Tabelas resumo	45
5.2 Efeito da variação da dosagem do agente bioestabilizador	47
5.2.1 Resistência à compressão (q_u) e módulo de deformabilidade (E_{u50})	47
5.2.2 Valor do pH do solo	49
5.2.3 Parâmetros da compressibilidade do solo.....	50
5.2.4 Coeficiente de consolidação	52
5.2.5 Tabelas Resumo.....	53
5.3 Ensaio SEM.....	54
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	58
6.1 Conclusões.....	58
6.2 Sugestões para trabalhos futuros	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
ANEXO A	A
ANEXO B	B

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Exemplo de um edifício verde como revestimento na fachada, em Universal City Walk, California (Kibert, 2013).	3
Figura 2.2 – Emissões de CO ₂ devido à produção de cimento durante o ano de 1967 e 2012 (Chang et al., 2016).	4
Figura 2.3 – Testes de UCS. a) Resistência à compressão simples não confinada dos diversos biopolímeros. b) Tempo de cura mínimo para obter um ganho de resistência à compressão simples de pelo menos 80% do valor do solo não tratado (adaptado de Fatehi et al., 2018).	5
Figura 2.4 – Resultados de ensaios UCS. Valores da resistência à compressão simples de um solo bioestabilizado usando vários polímeros (Chang et al., 2016)	6
Figura 2.5 – Estrutura química do Xantano (Nugent et al., 2010).	6
Figura 2.6 – Valores de q_u utilizando dois métodos de mistura de Xantano no solo. (Chang et al., 2015).....	7
Figura 2.7 – Resultados de ensaios UCS. a) Valores de resistência à compressão de um solo: não tratado, bioestabilizado com 1% de Xantano e estabilizado com 10% de cimento; b) Módulo de deformabilidade dos casos anteriores (adaptado de Chang et al., 2015).	8
Figura 2.8 – Testes UCS. Valores de resistência à compressão simples aplicando dosagens e tempos de cura diferentes. (Lee et al., 2019).....	9
Figura 2.9 – Curvas edométricas relativas a solos bioestabilizados com diversas dosagens de Xantano (adaptado de Cabalar et al., 2017).	10
Figura 2.10 – Variação do índice de vazios em função da tensão efectiva vertical para o solo bioestabilizado com 0.5% de Xantano e para o solo não tratado. Valores dos parâmetros de compressibilidade e de expansibilidade para ambas as situações (Kwon et al., 2019).	11
Figura 2.11 – Resultados de ensaios edométricos: a) Curva edométrica do solo natural (KUNT) e do solo bioestabilizado para diversos tempos de cura (KT 7D, KT 28D, KT 90D); b) Evolução dos parâmetros de compressibilidade ao longo do tempo de cura (Latifi et al., 2017).	12
Figura 2.12 – Ensaio SEM ao solo bioestabilizado com Xantano (Ayeldeen et al., 2017).....	12
Figura 2.13 - Definição de C_c e C_r através de uma curva edométrica (adaptado de Kurnaz et al., 2016).	14
Figura 2.14 – Aplicação do método de Casagrande para a obtenção do valor da tensão de cedência (σ'_p) (adaptado de Jumikis, 1967).	15
Figura 2.15 – Aplicação do método de Taylor para a obtenção do coeficiente de consolidação (C_v) (Coelho, 2000).	17
Figura 3.1 – Fracção de saibro e fracção de argila.	18

Figura 3.2 - Curva granulométrica do solo A25/S75.....	19
Figura 3.3 - Ensaio do Proctor Leve.....	20
Figura 3.4 – Medição do valor do pH do solo A25/S75 em laboratório.	21
Figura 4.1 - Procedimento do método de mistura do agente bioestabilizador no solo.....	25
Figura 4.2 – Compactação dos provetes para o ensaio UCS.....	26
Figura 4.3 – Compactação dos provetes para o ensaio edométrico.....	27
Figura 4.4 - Legenda da prensa usada nos ensaios UCS.	28
Figura 4.5 – Procedimento do ensaio UCS	30
Figura 4.6 – Bedding – error.	31
Figura 4.7 - Descrição do: a) edómetro ; b) Célula edométrica	32
Figura 5.1 - Gráficos tensão-extensão (q_u - ϵ_a) para os provetes estabilizados com 1% de Xantano com tempos de cura crescentes em câmara húmida: a) 3 dias; b) 7 dias; c) 14 dias e d) 28 dias.	40
Figura 5.2 - Resistência à compressão não confinada (q_u) e módulo de deformabilidade (E_{u50}) vs tempo de cura em câmara húmida (3,7,14 e 28 dias).....	41
Figura 5.3 – a) Valores do pH do solo estabilizado vs tempo de cura (3,7,14 e 28 dias); b) Valores de resistência à compressão (q_u) e módulo de deformabilidade (E_{u50}) vs pH do solo estabilizado.....	42
Figura 5.4 - Curvas $\log \sigma'_v - e$	43
Figura 5.5 - Valores do índice de compressibilidade (C_c) e do índice de recompressibilidade (C_r) vs tempo de cura (3, 7, 14 e 28 dias).....	44
Figura 5.6 - Valores da tensão de cedência vs tempo de cura (para a dosagem estabilizadora base).....	44
Figura 5.7 – Evolução do parâmetro C_v para dois escalões distintos com a variação do tempo de cura.....	45
Figura 5.8 - Gráficos tensão-extensão (q_u - ϵ_a) para os provetes estabilizados com 14 dias de tempo de câmara húmida com o aumento de dosagem de Xantano: a) 0%; b) 0.25%; c) 0.5%; d) 1%; e) 1.5% e f) 2%	48
Figura 5.9 - Evolução dos parâmetros mecânicos do solo para os provetes bioestabilizados com uma dosagem crescente de Xantano: a) Resistência à compressão (q_u); b) Módulo de deformabilidade (E_{u50}).....	49
Figura 5.10 - Valores do pH dos provetes bioestabilizados para dosagens de Xantano crescentes.....	49
Figura 5.11 - Curvas $\log \sigma'_v - e$ para os provetes bioestabilizados com dosagens crescentes de Xantano.....	50
Figura 5.12 - Valores do índice de compressibilidade (C_c) e do índice de recompressibilidade (C_r) para provetes de solo bioestabilizado com dosagens de Xantano crescentes.....	51
Figura 5.13 - Valores da tensão de cedência para os provetes bioestabilizados com dosagem crescente de Xantano.	52
Figura 5.14 – Evolução do parâmetro C_v para dois escalões distintos com a variação da dosagem de Xantano.....	53

Figura 5.15 – Ensaio SEM de uma amostra sem estabilização. a) Estrutura da amostra; b) Análise química da amostra.....	55
Figura 5.16 - Ensaio SEM da amostra bioestabilizada com uma dosagem de 1%. a) Estrutura da amostra; b) Análise química da amostra.....	56
Figura 5.17 - Ensaio SEM da amostra bioestabilizada com uma dosagem de 2%. a) Estrutura da amostra; b) Análise química da amostra.....	57

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Módulo de deformabilidade para as diversas dosagens aplicadas. a) Para um tempo de cura de 3 dias; b) Para um tempo de cura de 28 dias (adaptado de Lee et al., 2019).	9
Quadro 2.2– Valores de resistência à compressão não confinada de um solo bioestabilizado com várias dosagens para tempos de cura diferentes (adaptado de Cabalar et al., 2017). 10
Quadro 2.3 – Coeficientes de consolidação extraídos por dois métodos distintos (Método de Casagrande e de Taylor): a) Dados relativos do solo não tratado; b) Dados relativos ao solo bioestabilizado com 0.5% de Xantano (adaptado Kwon et al., 2019). 11
Quadro 4.1 – Diferentes dosagens e respectiva massa em gramas para preparar 1.5 kg de solo. 24
Quadro 4.2 – Plano de ensaios. 38
Quadro 5.1 – Valores de pH e dos parâmetros de resistência para todos os tempos de cura analisados. 46
Quadro 5.2 – Valores dos parâmetros extraídos através do ensaio edométrico para diferentes tempos de cura. 46
Quadro 5.3 – Valores de pH e dos parâmetros de resistência para as diferentes dosagens. 53
Quadro 5.4 – Valores dos parâmetros extraídos através de ensaios edométricos para diferentes dosagens. 54

SIMBOLOGÍA

A – Área da secção transversal

A_{corr} – Área da secção transversal corrigida

Au - Ouro

C_c – Índice de compressibilidade

CO₂ – Dióxido de carbono

C_r – Índice de recompressibilidade

C_s – Índice de expansibilidade

C_v – Coeficiente de consolidação

D – Diâmetro do provete

e – Índice de vazios

E_{u50} – Módulo de deformabilidade para 50% da tensão de rotura

ε_a – Extensão axial

F - Força

G_s – Densidade das partículas sólidas

h – Altura do provete

H – Máximo percurso da água num estrato em consolidação

q_u – Resistência à compressão simples (não confinada)

q_{u50} – Tensão correspondente a 50% da carga rotura

s₀ – Assentamento inicial

T – Factor tempo num processo de consolidação generalizado

Ū_z – Grau de consolidação médio num processo de consolidação vertical

V – Volume

w – Teor em água

W_{opt} – Teor de água óptimo

γ_d – Peso volúmico seco

Δδ_v – Variação do deslocamento vertical

σ_p – Tensão de cedência

σ_{v0} – Tensão efectiva vertical de repouso

σ_v – Tensão efectiva vertical

ABREVIATURAS

ASTM – American Society for Testing and Materials

BS – British Standart

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

IPN – Instituto Pedro Nunes

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NP – Norma Portuguesa

NRRL – Northern Regional Research Laboratory

OCR – Grau de sobreconsolidação

ONU – Organização das Nações Unidas

pH – Potencial de Hidrogénio

PVC – Policloreto de vinil

SEM – Scanning Electron Microscopes

UCS – Unconfined Compression Strength

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

Devido ao crescimento populacional, existe a necessidade de explorar terrenos menos favoráveis que sirvam de base à construção de infraestruturas, onde as propriedades e características geotécnicas desses solos não são adequadas a tal. Como solução a esta problemática, há a necessidade de implementar técnicas de melhoramento do solo, existindo dois tipos de técnicas que actualmente são aplicadas nos solos: técnicas de reforço do solo e as técnicas de melhoramento dos solos (também denominado técnicas de estabilização). As técnicas de reforço dos solos implicam a introdução de elementos resistentes (estacas, pregagens, ancoragens, etc), melhorando assim a resistência do maciço às solicitações submetidas. As técnicas de melhoramento do solo baseiam-se na modificação de uma ou várias propriedades inerentes ao solo através de processos de natureza química, física ou mecânica, como por exemplo, a compactação, o “jet grouting” e o “deep mixing” (Cardoso, 1987).

Após a Revolução Industrial, o cimento Portland foi inventado e começou por ser um dos materiais mais usados na área da construção civil, sendo também adoptado em técnicas de estabilização de solos (Chang et al., 2016). O uso excessivo deste material ao longo dos anos tem vindo a afectar negativamente o ambiente, pois a produção do cimento origina uma elevada quantidade de emissões de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera, o que contribui para um dos maiores problemas da actualidade, o aquecimento global. Desde o início do século XXI, novas técnicas de estabilização que recorrem a processos biológicos começaram por ser alvo de estudo, devido ao seu potencial para melhorar as propriedades do solo e a sua vantagem de reduzir o impacte ambiental, consistindo numa alternativa às técnicas convencionais.

Actualmente, existem diversas técnicas de estabilização de solos que recorrem a processos biológicos, sendo uma delas através do uso de biopolímeros. No âmbito do presente trabalho, será abordado a bioestabilização de um solo artificialmente preparado em laboratório classificado como areia siltosa, através do uso de um biopolímero, denominado Xantano, com o intuito de analisar a influência da variação da sua dosagem e do tempo de cura nos parâmetros associados à resistência e à compressibilidade do solo bioestabilizado.

1.2 Estrutura da dissertação

A presente dissertação é constituída por 6 capítulos diferentes, que se encontram seguidamente especificados:

Capítulo 1 – Introdução: Enquadramento geral do tema e apresentação da estrutura da dissertação.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: Definição de conceitos e apresentação de conclusões de estudos de outros autores relacionados com o tema.

Capítulo 3 – Caracterização do solo: Classificação do solo criado em laboratório, em que se caracteriza a sua composição granulométrica, os seus limites de consistência, a densidade das partículas do solo, o teor de humidade óptimo e o valor do pH do solo natural.

Capítulo 4 – Procedimento Laboratorial: Apresentação da lista de todo o material e equipamento utilizado, descrição da preparação dos provetes, apresentação do método de mistura do agente bioestabilizador (Xantano) e da técnica de compactação e, por fim, especificação de todos os procedimentos laboratoriais adoptados e elaboração do plano de ensaios.

Capítulo 5 – Discussão e apresentação de resultados: exposição dos resultados obtidos e respectiva interpretação, comparando, sempre que possível, com os resultados de trabalhos de outros autores.

Capítulo 6 – Conclusões e sugestões de trabalhos futuros: Neste último capítulo destacam-se as principais conclusões a retirar do trabalho e propõem-se trabalhos futuros relacionados com o tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biotecnologia aplicada. Desenvolvimento sustentável

De acordo com a UNESCO (2020), a biotecnologia define-se pela utilização de organismos vivos (plantas, animais, micro-organismos e processos biológicos) para alcançar avanços em áreas como a indústria, medicina e agricultura, promovendo assim o desenvolvimento e benefício da humanidade.

A biotecnologia pode ser inserida nas áreas de actuação da Engenharia Civil, no sentido de contribuir para a minimização do impacte ambiental e, conseqüentemente, promover o desenvolvimento sustentável. Torgal et al. (2015) enumeram vários exemplos de aplicações na área supracitada: a descontaminação de solos; bioestabilização de solos ou construção de edifícios verdes como revestimentos de fachadas (ilustrado na Figura 2.1).



Figura 2.1 - Exemplo de um edifício verde como revestimento na fachada, em Universal City Walk, California (Kibert, 2013).

Devido ao aumento exponencial da população mundial e ao desenvolvimento económico registado no início do século XX surge a necessidade de melhorar os solos existentes (Massarsch, 2005). Um dos materiais capazes de responder a esta necessidade é o cimento Portland, material usado em abundância nas últimas décadas que contribui para o

aquecimento global devido à libertação de CO₂ para a atmosfera (DeJong et al., 2010). A Figura 2.2 ilustra a evolução crescente de emissões globais de CO₂ (B-ton/ano) e a evolução crescente do coeficiente de emissões de CO₂ provocadas pela produção de cimento (%), no período 1967-2012 (Chang et al., 2016).

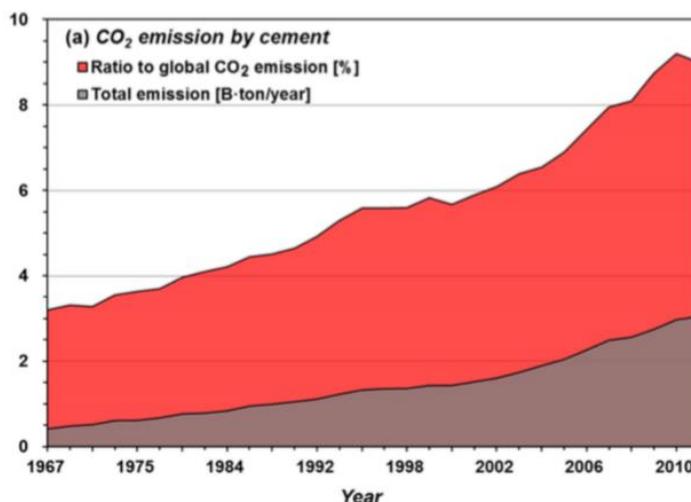


Figura 2.2 – Emissões de CO₂ devido à produção de cimento durante o ano de 1967 e 2012 (Chang et al., 2016).

Constata-se que o uso excessivo deste material e a sua dependência tem vindo a provocar um impacto negativo no ambiente (Chang et al., 2016). Por isso mesmo, torna-se necessário dar respostas conscientes e que não comprometam as gerações futuras, e, neste sentido, as técnicas de bioestabilização de solos podem ser uma escolha interessante de forma a promover o desenvolvimento sustentável.

2.2 Bioestabilização através do uso de biopolímeros.

A bioestabilização é uma técnica que tem vindo a ser explorada nos últimos anos por vários autores e tem como finalidade melhorar as propriedades dos solos recorrendo a processos biológicos, sendo visto como uma técnica promissora de melhoramento de solos granulares, e visto como uma boa alternativa aos métodos convencionais (DeJong et al., 2006).

As técnicas de bioestabilização com o objectivo de melhorar as características dos solos podem recorrer ao uso de biopolímeros. Os biopolímeros são polímeros biodegradáveis produzidos por seres vivos (tais como: fungos, bactérias ou algas) que devido ao seu comportamento natural são usados, principalmente, na alteração do comportamento reológico de produtos (aumentando a sua viscosidade), sendo por isso úteis em várias áreas, nomeadamente na produção de alimentos, agricultura, cosmética, medicina ou farmácia (Velde & Kiekens, 2001). Recentemente, tem-se vindo a estudar a possibilidade da utilização

dos biopolímeros na área da geotecnia, mais propriamente para promover a melhoria das propriedades dos solos (Ivanov & Chu, 2008).

Fatehi et al. (2018) compararam o comportamento de quatro biopolímeros distintos (Gelano, Ágar, Xantano e Lignina) e duas proteínas sintetizadas por biopolímeros (caseína e caseinato de sódio) aplicados num solo arenoso. Os resultados obtidos expostos na Figura 2.3 a) apontam que o Xantano é aquele que promove uma maior resistência à compressão não confinada. Um outro aspecto examinado neste estudo foi o tempo de cura necessário para que o ganho de resistência à compressão fosse pelo menos 80% em relação ao solo não tratado (Figura 2.3 b). No caso do Xantano o estudo aponta que é necessário um tempo de cura de 14 dias.

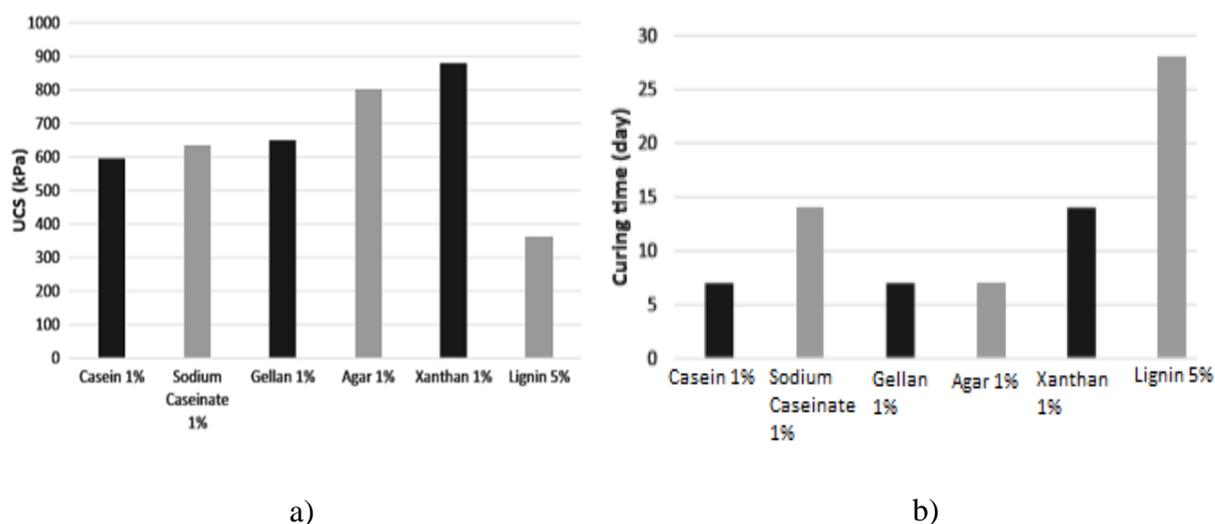


Figura 2.3 – Testes de UCS. a) Resistência à compressão simples não confinada dos diversos biopolímeros. b) Tempo de cura mínimo para obter um ganho de resistência à compressão simples de pelo menos 80% do valor do solo não tratado (adaptado de Fatehi et al., 2018).

Chang et al. (2016) desenvolveram um trabalho onde compara o efeito que vários biopolímeros (Gelano, Ágar, Xantano e β - Glucana) produzem num solo, classificado como CL. Com o objectivo de analisar os ganhos de resistência à compressão simples não confinada foram introduzidas dosagens compreendidas entre 0.5% a 1% de cada biopolímero no solo, sendo também apresentada para efeitos de comparação os valores da resistência à compressão do solo misturado com 10% de cimento e do solo não bioestabilizado. O Xantano foi aquele que manifestou melhores resultados, tal como sugere a Figura 2.4, com ganhos de resistência cerca de 5 vezes em relação ao solo não tratado e cerca do dobro em relação ao solo tratado com 10% de cimento.

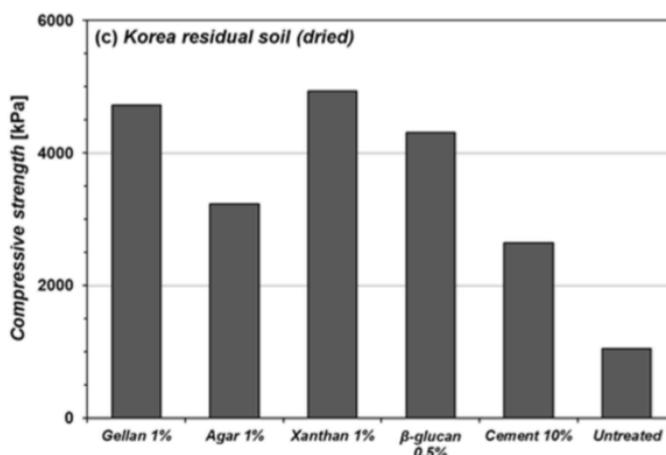


Figura 2.4 – Resultados de ensaios UCS. Valores da resistência à compressão simples de um solo bioestabilizado usando vários polímeros (Chang et al., 2016)

2.3 Bioestabilização através do uso de Xantano

No âmbito da presente dissertação, o estudo irá incidir num biopolímero em particular, o Xantano. Este biopolímero foi descoberto na década de 1950 por investigadores do NRRL (Northern Regional Research Laboratory), do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, em Illinois nos Estados Unidos da América (García-Ochoa et al., 2000). Trata-se de um polissacarídeo natural, obtendo-se através de processos fermentativos usando a bactéria *Xanthomonas campestris* (Chang et al., 2015). A sua estrutura molecular encontra-se exposta na Figura 2.5 (Nugent et al., 2010).

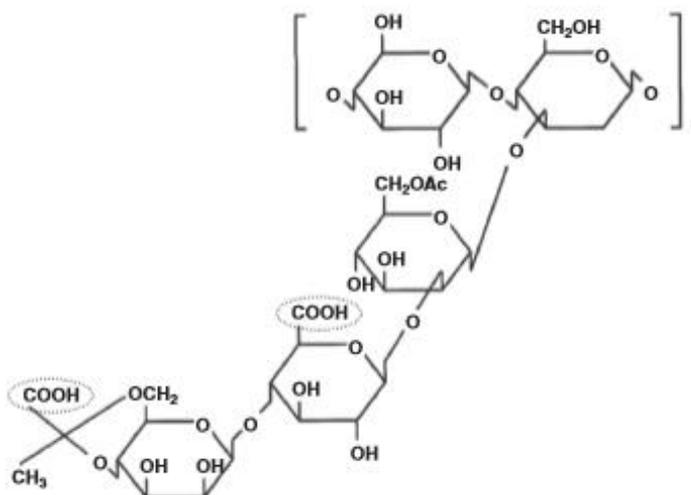


Figura 2.5 – Estrutura química do Xantano (Nugent et al., 2010).

O Xantano apresenta uma estrutura primária composta de repetidas unidades pentassacarídicas. É constituída, geralmente, de unidades de β -D-glicose unidas por ligação 1-4, formando assim a cadeia principal desta estrutura química (Borges & Vendruscolo, 2008).

Este biopolímero tem como principal característica aumentar a viscosidade de soluções, tendo a capacidade de exibir esta propriedade perante altas variações de temperaturas (suportando até 383°C) e de numa gama de valores de pH entre 2 a 12 (Dehghan et al., 2019). De toda a quantidade de Xantano produzido globalmente, estima-se que 65% é aplicado na indústria alimentar, onde são usados como agentes estabilizantes, emulsificantes e espessantes em alimentos. Outros 15% inserem-se na indústria do petróleo, sendo a restante percentagem utilizada em aplicações diversas (Borges & Vendruscolo, 2008). Estudos recentes apontam que o Xantano pode também ser aplicado na área da geotecnia, onde pode contribuir para o melhoramento das propriedades mecânicas de solos.

Chang et al. (2015) estudaram dois métodos de mistura distintos, o método seco (o Xantano em pó é misturado directamente no solo) e o método húmido (o Xantano é misturado na água e posteriormente adiciona-se a solução ao solo) num solo designado por “Red Yellow” com o intuito de estudar a resistência à compressão para 3, 7, 14, 21, 28 dias de cura e para uma concentração de Xantano de 1%. A Figura 2.6 sugere que o método seco é mais eficiente pois origina valores de resistência à compressão mais elevados para os diferentes tempos de cura face ao método húmido.

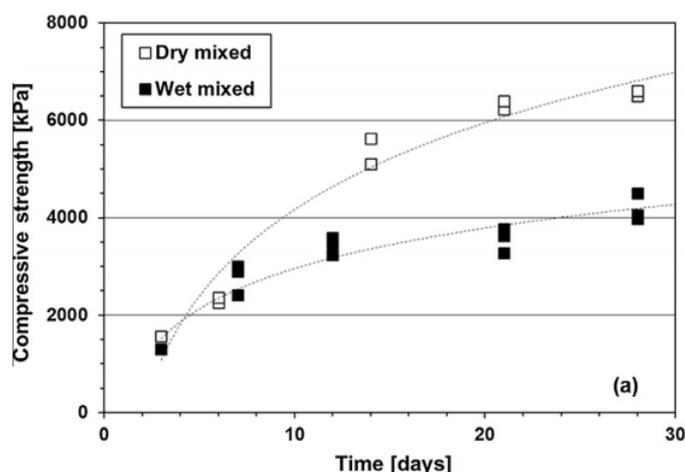


Figura 2.6 – Valores de q_u utilizando dois métodos de mistura de Xantano no solo. (Chang et al., 2015)

Estes autores estudaram ainda a resistência à compressão e o módulo de deformabilidade após o processo de bioestabilização para quatro solos com diferentes granulometrias, dos quais dois são solos bem graduados (solo natural e solo “Red Yellow”) e os outros dois são mal graduados (solo argiloso e solo arenoso). Segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos, o solo natural classifica-se como SP-SM; o solo arenoso como SP; o solo argiloso como CH e o solo “Red Yellow” como CL. Para termos de comparação foi também analisado os resultados do processo de estabilização através de cimento (10%) para o solo “Red Yellow”. Os resultados deste estudo, ilustrados na Figura 2.7, mostram que no geral todos os solos beneficiam com a bioestabilização através do Xantano. Confrontando os resultados do

solo argiloso e arenoso, verifica-se que o solo argiloso em contacto com este biopolímero tem efeitos mais vantajosos no que toca à resistência à compressão e ao módulo de deformabilidade comparativamente ao solo arenoso. Estes resultados indicam que a interação que o Xantano forma com as partículas mais finas (argila) origina uma resistência à compressão mais expressiva do que a interação com partículas de maiores dimensões (grãos de areia). Ainda com base nos resultados da Figura 2.7, verifica-se que o solo natural e o solo “Red Yellow” foram os que manifestaram as mais altas resistências, o que aponta que o uso do Xantano poderá ser mais eficiente aplicado em solos bem graduados em vez de solos mal graduados.

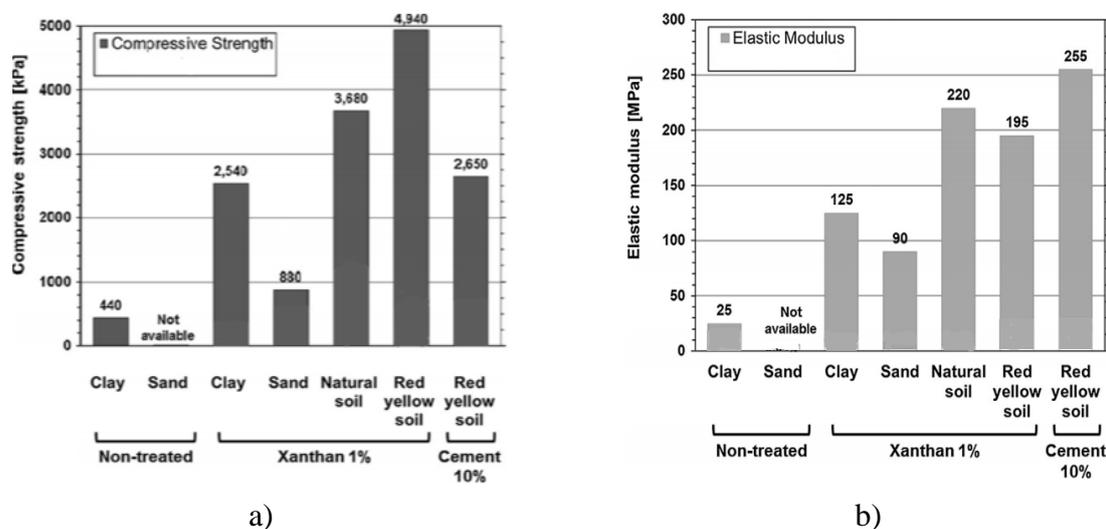


Figura 2.7 – Resultados de ensaios UCS. a) Valores de resistência à compressão de um solo: não tratado, bioestabilizado com 1% de Xantano e estabilizado com 10% de cimento; b) Módulo de deformabilidade dos casos anteriores (adaptado de Chang et al., 2015).

Lee et al. (2019) publicaram uma investigação onde revelam as vantagens da bioestabilização através de Xantano em termos do melhoramento do comportamento mecânico (resistência à compressão simples não confinada (q_u) e módulo de deformabilidade (E_{u50})) de um solo destinado para a construção de uma estrada no Sri Lanka, tratando-se de uma areia siltosa classificada como SM. Neste estudo foram introduzidas 3 dosagens diferentes (1, 1.5 e 2%) analisadas para 2 tempos de cura (3 e 28 dias). Os resultados são mais eficazes para os tempos de cura superiores, aumentando com o aumento da dosagem de Xantano. Os resultados mostram ainda que para o tempo de cura de 3 dias a resistência para uma dosagem de 2% de Xantano é inferior à obtida com dosagens mais baixas. O autor sugere que tal acontece devido à forte capacidade de retenção de água dos hidrogéis formados pelo Xantano, retardando assim a desidratação e conseqüente formação da matriz Solo – Xantano. Na Figura 2.8 pode-se observar os resultados obtidos.

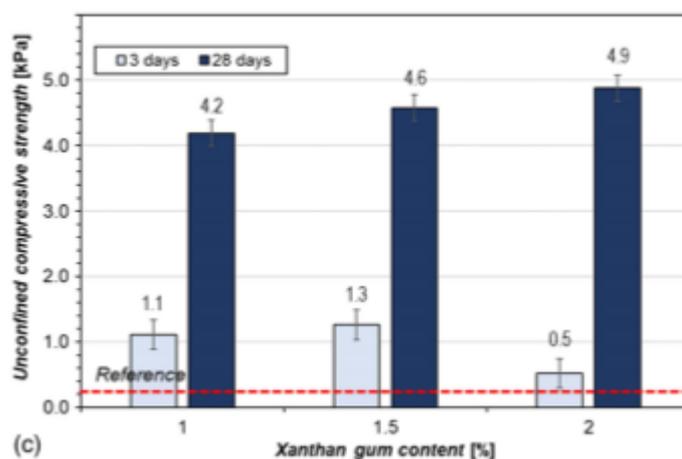


Figura 2.8 – Testes UCS. Valores de resistência à compressão simples aplicando dosagens e tempos de cura diferentes. (Lee et al., 2019)

No mesmo estudo é também quantificado o módulo de deformabilidade, onde se constata que este decresce com o aumento da dosagem de Xantano. No Quadro 2.1 estão representados os respectivos valores, para os dois diferentes tempos de cura.

Quadro 2.1 – Módulo de deformabilidade para as diversas dosagens aplicadas. a) Para um tempo de cura de 3 dias; b) Para um tempo de cura de 28 dias (adaptado de Lee et al., 2019).

Dosagem (%)	E ₅₀ (MPa)	Dosagem (%)	E ₅₀ (MPa)
2.0	12.6	2.0	141.8
1.5	42.3	1.5	150.4
1.0	54.0	1.0	167.6

a)

b)

Cabalar et al. (2017) realizaram ensaios UCS de modo a analisar a variação de resistência à compressão simples não confinada (q_u) de um solo bioestabilizado com recurso ao uso de Xantano. Este trabalho pretendeu estudar o efeito de diferentes dosagens de Xantano (0.5, 1, e 1.5%) e diferentes tempos de cura (1, 3, 7, 14 e 28 dias) num solo arenoso extraído de Gaziantep (Turquia). Os resultados obtidos indicam que o valor da resistência à compressão (q_u) aumenta com a introdução de uma maior dosagem de Xantano e de um maior tempo de cura (Quadro 2.2).

Quadro 2.2– Valores de resistência à compressão não confinada de um solo bioestabilizado com várias dosagens para tempos de cura diferentes (adaptado de Cabalar et al., 2017).

Tempo de cura (dias)	Testes UCS (MPa) de amostras com diferentes dosagens de Xantano		
	0.5%	1.0%	1.5%
1	1.13	1.81	1.85
3	1.35	1.85	1.95
7	1.41	1.93	2.04
14	1.45	2.11	2.24
28	1.84	2.19	2.71

Estes autores também efectuaram ensaios edométricos de modo a avaliar a compressibilidade do solo supramencionado não tratado e do solo bioestabilizado com as diferentes dosagens de Xantano (0.5%, 1%, 1.5%). Os resultados revelam que a presença de Xantano tem efeitos marcantes na compressibilidade, diminuindo-a tanto em fase de carga como na fase de descarga (Cabalar et al., 2017) como sugere a Figura 2.9.

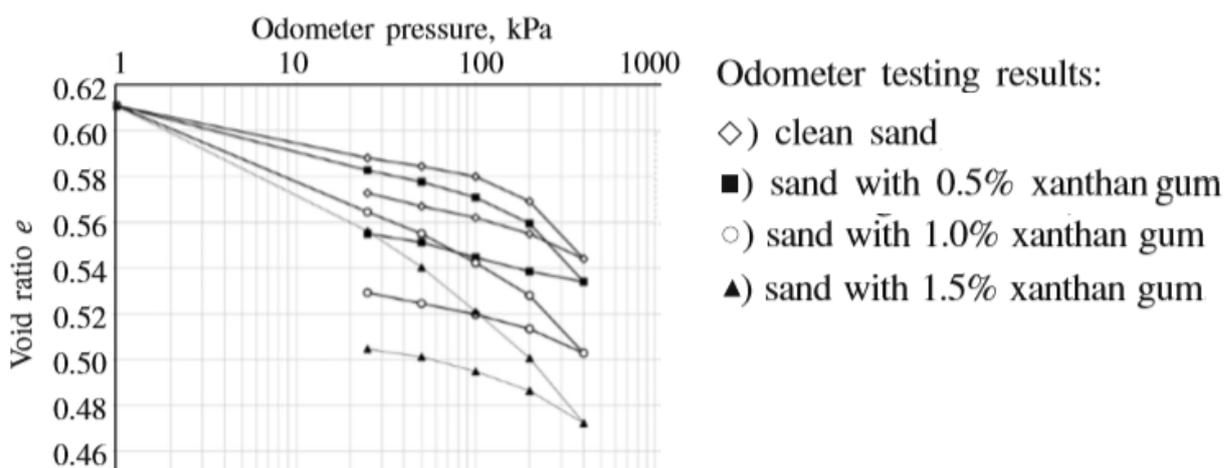


Figura 2.9 – Curvas edométricas relativas a solos bioestabilizados com diversas dosagens de Xantano (adaptado de Cabalar et al., 2017).

Kwon et al. (2019) realizaram ensaios edométricos no sentido de perceber a evolução dos parâmetros de compressibilidade e do coeficiente de consolidação de um solo classificado como uma argila com alta plasticidade (CH), comparando os resultados do solo supracitado não estabilizado com o solo estabilizado (0.5% de Xantano). A Figura 2.10 mostra que o processo de bioestabilização através do uso de Xantano aumenta o índice de compressibilidade (de 0.226 para 0.38) e o índice de expansibilidade (de 0.007 para 0.035).

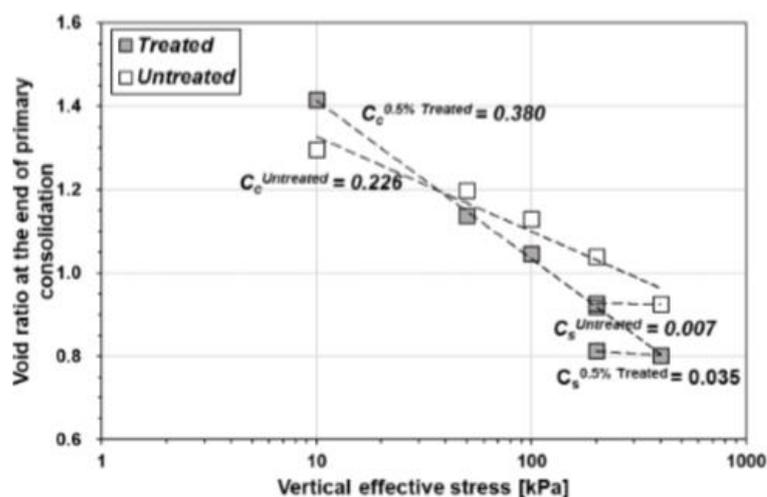


Figura 2.10 – Variação do índice de vazios em função da tensão efectiva vertical para o solo bioestabilizado com 0.5% de Xantano e para o solo não tratado. Valores dos parâmetros de compressibilidade e de expansibilidade para ambas as situações (Kwon et al., 2019).

Estes autores, para as condições supramencionadas, pretenderam entender a evolução do coeficiente de consolidação (C_v), determinado pelo método de Casagrande ($\log t$) e pelo método de Taylor (\sqrt{t}). Os resultados apresentados no Quadro 2.3 indicam que o coeficiente de consolidação diminui com o processo de bioestabilização.

Quadro 2.3 – Coeficientes de consolidação extraídos por dois métodos distintos (Método de Casagrande e de Taylor): a) Dados relativos do solo não tratado; b) Dados relativos ao solo bioestabilizado com 0.5% de Xantano (adaptado Kwon et al., 2019).

Soil	Load [kPa]	C_v [mm ² /min]		Soil	Load [kPa]	C_v [mm ² /min]	
		Log t	\sqrt{t}			Log t	\sqrt{t}
Untreated	10	6.61	7.39	Treated (0.5%)	10	0.27	0.24
	50	5.60	7.55		50	0.22	0.20
	100	4.41	5.78		100	0.35	0.32
	200	4.82	6.33		200	0.42	0.28
	400	6.05	6.35		400	0.29	0.34

a)

b)

Latifi et al. (2017) analisaram a evolução dos parâmetros de compressibilidade de um solo argiloso (Caulinite branca), classificado como CI de acordo com a British Soil Classification, submetido a um processo de bioestabilização através do uso de Xantano. A Figura 2.11 a) representa as curvas edométricas do solo não tratado e do solo bioestabilizado com uma dosagem de 1.5% para vários tempos de cura (7, 28 e 90 dias). A Figura 2.11 b) ilustra a

evolução dos parâmetros de compressibilidade para as condições adoptadas. Os resultados evidenciam que um maior tempo de cura proporciona uma redução nos índices de compressibilidade/expansibilidade e, segundo os autores, a tensão de cedência aumenta.

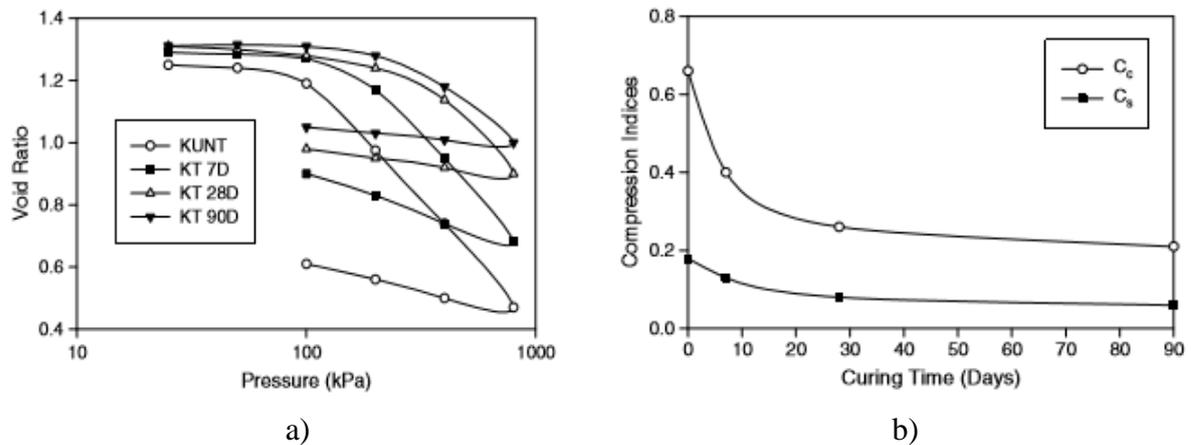


Figura 2.11 – Resultados de ensaios edométricos: a) Curva edométrica do solo natural (KUNT) e do solo bioestabilizado para diversos tempos de cura (KT 7D, KT 28D, KT 90D); b) Evolução dos parâmetros de compressibilidade ao longo do tempo de cura (Latifi et al., 2017).

Ayeldeen et al. (2017) submeteram uma amostra de solo bioestabilizado proveniente do Egipto a ensaios SEM de forma a identificar a presença de Xantano. A Figura 2.12 ilustra a presença das ligações criadas entre o Xantano e as partículas do solo.

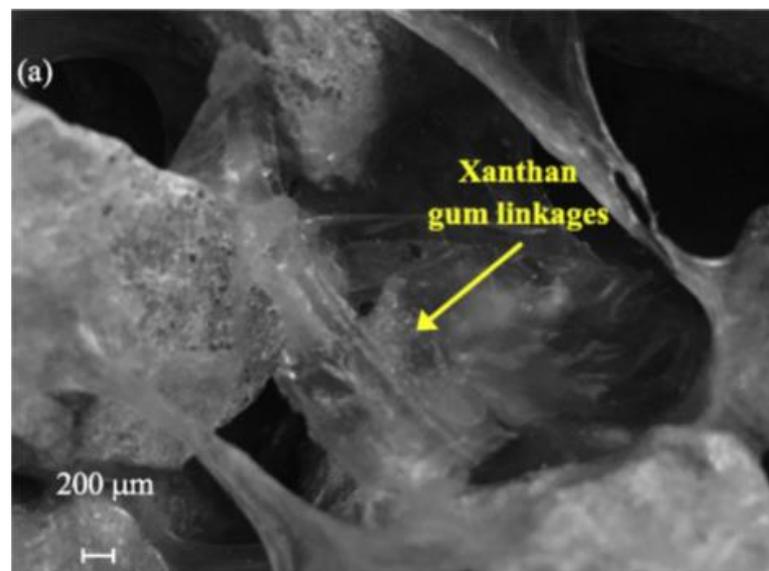


Figura 2.12 – Ensaio SEM ao solo bioestabilizado com Xantano (Ayeldeen et al., 2017).

2.4 Compressibilidade e consolidação primária

É de conhecimento geral que a aplicação de cargas sob um solo provoca assentamentos, que podem ser mais acentuados em solos em que as características mecânicas sejam desfavoráveis. De modo a garantir o bom comportamento do solo em obras geotécnicas, torna-se então necessário quantificar parâmetros relativos à compressibilidade e avaliar o seu processo de consolidação.

O solo quando submetido a uma determinada carga estática sofre deformações volumétricas no sentido de a absorver. Estas deformações englobam várias parcelas, mas são provocadas principalmente pela redução do seu índice de vazios no tempo, devido à expulsão de água dos poros do solo e ao rearranjo das partículas do solo. A quantificação da magnitude destas deformações define a compressibilidade de um solo. Importa também caracterizar a evolução das deformações no tempo, que está relacionado com a transferência de tensões ao longo do tempo, da fase líquida para o esqueleto sólido, até que se anule o excesso de pressão neutra, processo este que é entendido por consolidação hidrodinâmica ou primária (Correia, 2011) e explicado pela Teoria da Consolidação Unidimensional, proposta por Karl Terzaghi em 1936.

O estudo da compressibilidade dos solos é realizado através de ensaios edométricos. Nestes ensaios, amostras representativas do solo são lateralmente confinadas e saturadas, onde posteriormente serão axialmente carregadas por escalões de carga, de modo a analisar a velocidade e magnitude das deformações. Para cada escalão, a carga é aplicada geralmente ao longo de 24h, havendo tempo suficiente para que a carga aplicada se converta em tensão efectiva, ou seja para que ocorra a dissipação do excesso de pressão neutra (consolidação), dando origem a uma curva edométrica que exprime a relação entre o índice de vazios (e) e a tensão efectiva vertical (σ_v) (expressa numa escala logarítmica), como ilustra a Figura 2.13. No âmbito do presente trabalho importa extrair desta curva os parâmetros de compressibilidade do solo, ou seja, o índice de compressibilidade (C_c), o índice de recompressibilidade (C_r) e o índice de expansibilidade (C_s). Complementarmente, será extraído e analisado a tensão de cedência (σ'_p) do solo em estudo.

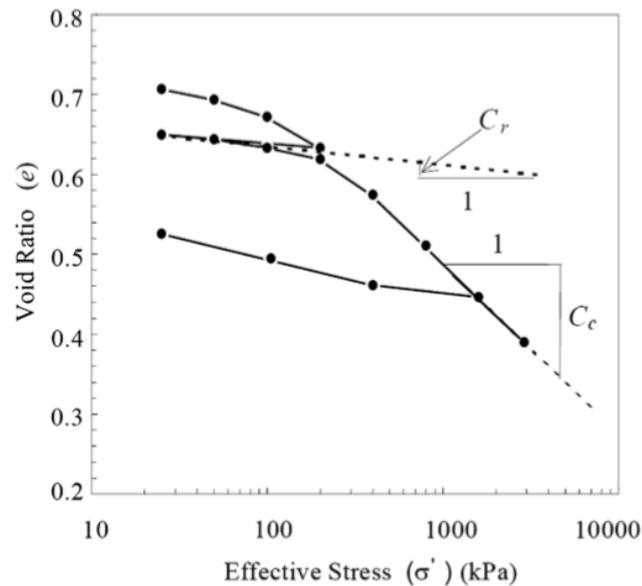


Figura 2.13 - Definição de C_c e C_r através de uma curva edométrica (adaptado de Kurnaz et al., 2016).

Na parte inicial do diagrama, a curva com o declive mais reduzido corresponde a tensões efectivas a que o solo já esteve sujeito ao longo da sua história geológica, designado por ramo sobreconsolidado. O troço rectilíneo do diagrama subsequente ao ramo sobreconsolidado corresponde a tensões efectivas que o solo nunca esteve submetido, sendo este denominado por ramo virgem. Como ilustra a Figura 2.16, o índice de compressibilidade do solo é definido como o declive (em módulo) do ramo virgem da curva edométrica (Eq. 2.1). Aplicando um raciocínio análogo, o índice de recompressibilidade/expansibilidade expressa o declive (em módulo) do ramo sobreconsolidado do mesmo diagrama (Eq. 2.2).

$$C_c = \left| \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} \right| \quad (\text{Eq. 2.1})$$

$$C_s \approx C_r = \left| \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} \right| \quad (\text{Eq. 2.2})$$

A tensão de cedência corresponde à abcissa do ponto da curva edométrica onde se nota uma alteração do comportamento do solo quando carregado, isto é, devido ao facto de para tensões inferiores o solo exibir uma baixa compressibilidade (por já ter suportado tais solicitações) e para tensões superiores começar a apresentar uma compressibilidade mais elevada (por nunca ter suportado tais solicitações ao longo da sua história geológica) (Fernandes, 2011).

Existem vários métodos para determinar o valor da tensão de cedência, nomeadamente, o método de Casagrande, que será aplicado no presente trabalho. Este método consiste no

seguinte procedimento empírico de forma a localizar aproximadamente o ponto de tensão de cedência (Jumikis, 1967):

- i. Localizar aproximadamente o ponto de maior curvatura (Ponto A no ramo de recompressão, por exemplo).
- ii. Através deste ponto, desenhar uma linha horizontal (A-h) e uma tangente ao ponto A (A-t)
- iii. Traçar a bissetriz (Ab) do ângulo formado pelas duas rectas anteriores (hAt)
- iv. Prolongar uma recta tangente do ramo virgem (ponto 5') até intersectar a bissetriz (Ab).
- v. A abcissa deste ponto de intersecção (σ'_p) representa a tensão de cedência.

A Figura 2.14 representa a aplicação do método de Casagrande, obedecendo aos passos supracitados.

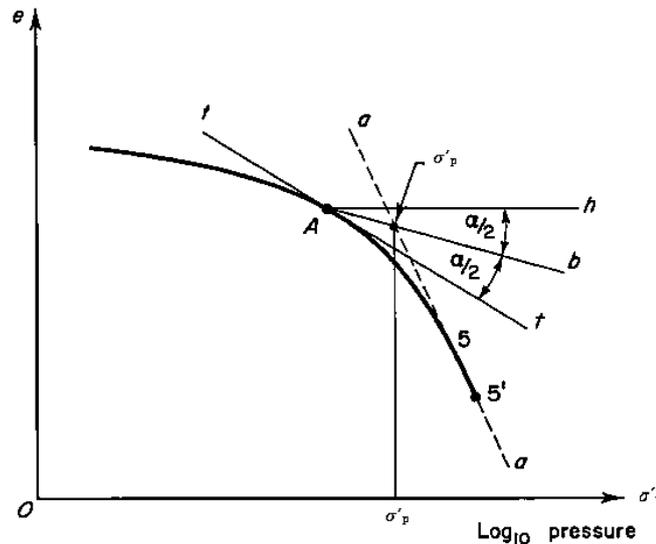


Figura 2.14 – Aplicação do método de Casagrande para a obtenção do valor da tensão de cedência (σ'_p) (adaptado de Jumikis, 1967).

O grau de sobreconsolidação do solo (OCR) estabelece a razão entre a tensão de cedência (σ'_p) e a tensão efectiva vertical actual do solo (σ'_{v0}) (Eq. 2.3).

$$\text{OCR} = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} \quad \text{Eq. 2.3}$$

Consoante o valor deste quociente o solo é classificado quanto ao seu grau de sobreconsolidação, dividindo-se em 3 classes:

- i. Solos normalmente consolidados (OCR=1), em que o estado de tensão “in situ” é igual à maior tensão experimentada pelo solo.

- ii. Solos sobreconsolidados ($OCR > 1$), o que significa que o solo já experimentou tensões superiores às tensões aplicadas no momento.
- iii. Solos subconsolidados ($OCR < 1$), o que indica que o solo nunca experimentou tensões superiores ao seu estado de tensão actual, ou seja, o solo ainda está em processo de consolidação.

O parâmetro que caracteriza a velocidade de consolidação de um solo é o coeficiente de consolidação (C_v), que depende principalmente da compressibilidade e da permeabilidade do solo. Este parâmetro é determinado através dos resultados do ensaio edométrico com base na variação da altura da amostra ao longo do tempo, para cada escalão de carga. Existem dois métodos normalmente usados para a determinação do coeficiente de consolidação, o método de Casagrande e de Taylor. No presente trabalho será aplicado o método de Taylor, no qual se constrói um diagrama que representa a raiz quadrada do tempo (nas abcissas) e a variação da altura da amostra (nas ordenadas). O procedimento para a determinação do C_v com base num diagrama deste tipo, consiste nos seguintes passos (Fernandes, 2011):

- i. Traçar duas rectas: uma tangente ao troço decrescente do diagrama que se estende até ao referencial das abcissas e uma outra cuja intersecção nas abcissas seja 1.15 vezes superior em relação à primeira.
- ii. A intersecção da segunda tangente com o diagrama permite determinar o ponto que corresponde a $\bar{U}_z = 90\%$, e respectivo t_{90} .
- iii. Sabendo que para $\bar{U}_z = 90\%$, o valor teórico de T vale 0.848 (Quadro A.1) e que H (maior distância que uma partícula de água tem de percorrer para abandonar o estrato em consolidação) é metade da altura total da amostra, determina-se o valor de C_v através da Eq. 2.4:

$$C_v = \frac{0.848 * H^2}{t_{90}} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

A Figura 2.15 ilustra a aplicação do método de Taylor para a determinação do coeficiente de consolidação, retirado de um ensaio real.

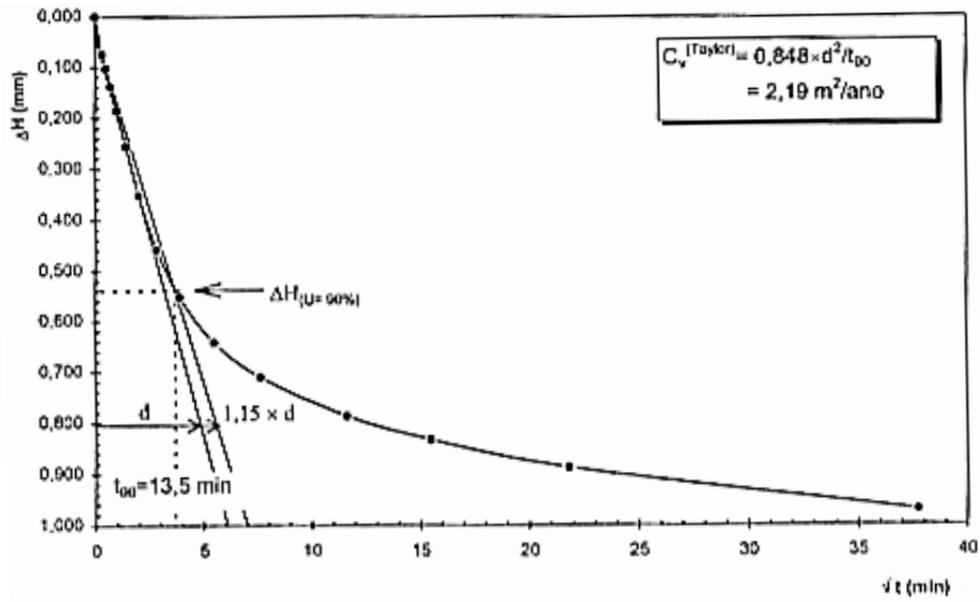


Figura 2.15 – Aplicação do método de Taylor para a obtenção do coeficiente de consolidação (C_v) (Coelho, 2000).

3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

3.1 Introdução

Este capítulo tem como finalidade caracterizar e classificar o solo em estudo, através da análise e determinação da sua 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.

O solo em estudo foi criado artificialmente em Laboratório e é constituído, em massa, por 75% de saibro e 25% de argila (denominado por A25/S75), fracções estas apresentadas na Figura 3.1. O saibro foi extraído na zona de Andrinos em Leiria e a argila foi extraída da Zona de Taveiro, Coimbra.



Figura 3.1 – Fracção de saibro e fracção de argila.

De salientar que toda a caracterização do solo foi elaborada em conjunto com o colega Joaquim Rosa, no âmbito da tese “*Biotecnologia em solos. Efeito da precipitação de CaCO_3 no comportamento de uma areia siltosa*”.

3.2 Composição granulométrica

Para determinar a distribuição granulométrica das partículas do solo recorreu-se à norma E 196-1966 do LNEC. Segundo a norma supracitada, existem dois métodos distintos a realizar consoante as dimensões das partículas do solo: a peneiração e a sedimentação. O método de peneiração baseia-se na determinação dos diâmetros das partículas de dimensões superiores ou iguais a 0.075mm (peneiro #200) e consiste na passagem do solo por sucessivos peneiros de malha quadrada, cada vez mais apertados, que através de movimentos de translação e de rotação permitem estimar a percentagem retida em cada peneiro de modo a obter a curva granulométrica relativa à fracção grossa. O método de sedimentação consiste na determinação dos diâmetros das partículas inferiores a 0.075 mm (peneiro #200) através da velocidade da sedimentação das mesmas, segundo a Lei de Stokes. Na Figura 3.2 está representada a curva granulométrica obtida para o solo em estudo onde se pode verificar que o solo contém 77.4% de areia, 16.1% de silte e 6.5% de argila.

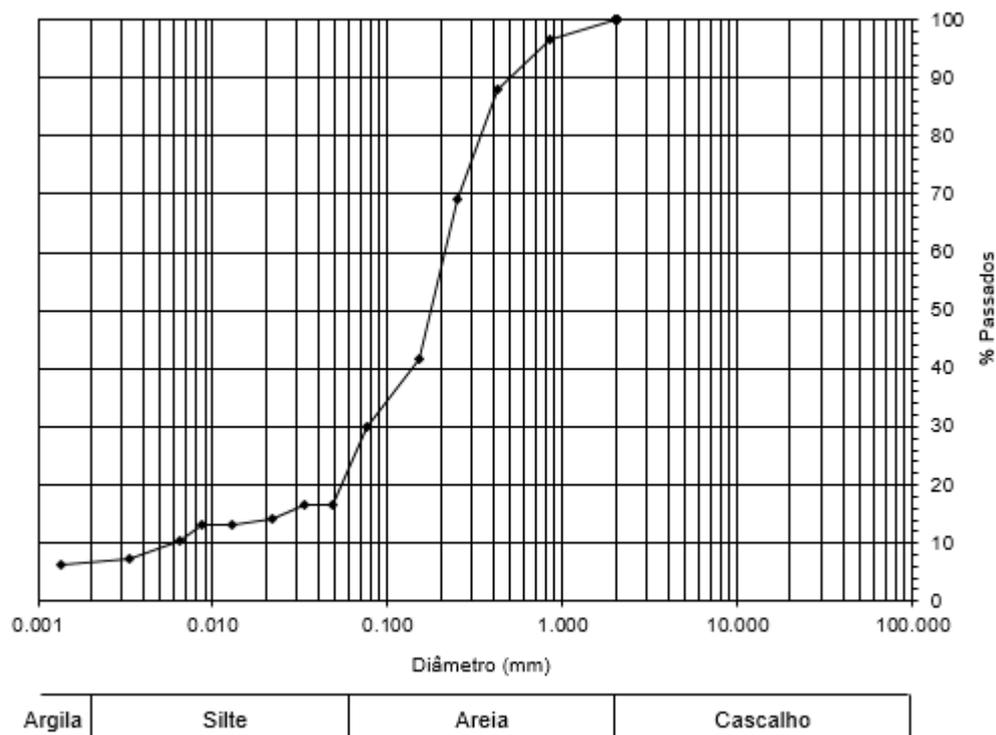


Figura 3.2 - Curva granulométrica do solo A25/S75.

3.3 Limites de consistência

Para definir os limites de liquidez, plasticidade e de retracção é utilizada a norma NP-143 (1969). O solo A25/S75 é composto maioritariamente por areia e não tem, 30% ou mais, de partículas inferiores a 0.05mm (Figura 3.2) e, segundo a norma supracitada, a determinação destes limites não são aplicáveis a este tipo de solos.

3.4 Densidade das partículas do solo

A densidade das partículas do solo (G) exprime o quociente da massa de um dado volume dessas partículas à temperatura do ensaio, pela massa de igual volume de água destilada a 20°C. De forma a calcular esta grandeza, seguiu-se o descrito na norma NP 83 (1965), assumindo o valor de 2.65 para o solo em estudo.

3.5 Ensaio Proctor

O ensaio de compactação, também conhecido como ensaio de Proctor, tem como objectivo determinar a relação entre o teor de água (W) e o peso volúmico seco de um solo (γ_d). Seguindo a especificação E 197- 1996 do LNEC, realizou-se a compactação num molde pequeno com um pilão de compactação leve (Ensaio Proctor leve), onde se determinou o teor de humidade e o peso volúmico de 6 provetes, de modo a estimar o teor óptimo de água e o correspondente peso volúmico seco máximo. De frisar que os teores em água foram calculados de acordo com o procedimento descrito na norma NP – 84 de 1965. A Figura 3.3 apresenta os valores obtidos, sendo o peso volúmico seco máximo de 18.8 KN/m^3 e o valor do teor de água óptimo de 11%.

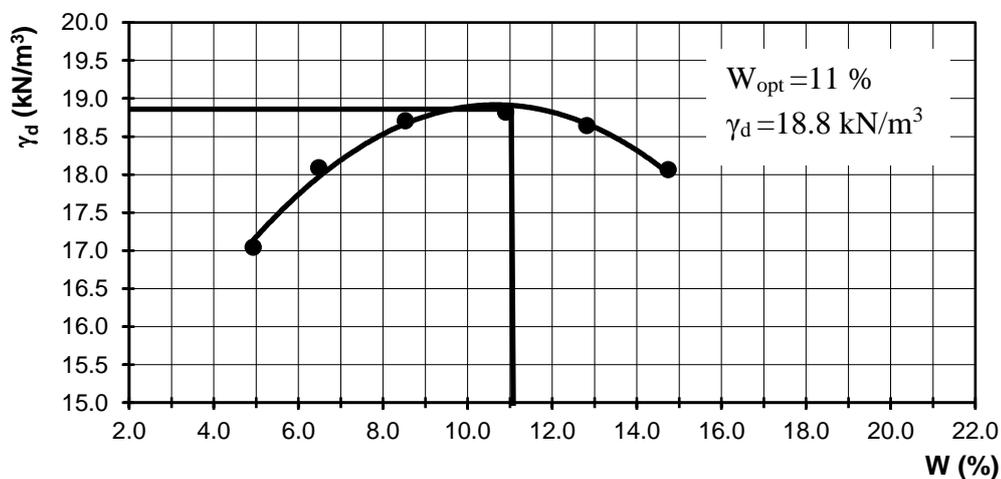


Figura 3.3 - Ensaio do Proctor Leve

3.6 Medição do valor do pH

A norma BS 1377-3 de 1990 da British Standard descreve todos os passos necessários para a determinação do valor do pH do solo A25/S75 sem estabilização. Respeitando os passos descritos na norma supracitada, utilizou-se um aparelho com uma precisão mínima de 0.01 e as suspensões do solo foram medidas a uma temperatura entre os 18 °C e os 19 °C, assumindo a grandeza supramencionada o valor de 7.96 para o solo em estudo (Figura 3.4).



Figura 3.4 – Medição do valor do pH do solo A25/S75 em laboratório.

3.7 Classificação unificada do solo

Nesta secção pretende-se classificar o solo em estudo e consequentemente prever o seu comportamento. Para esse efeito foi consultada a norma ASTM D 2487 (1998), onde se concluiu que o solo A25/S75 é classificado como uma Areia Siltosa correspondendo ao símbolo SM. De acordo com Lambe e Whitman, (1979) o solo em estudo, quando aplicado em obras de aterro, apresenta uma boa resistência ao corte quando compactado e saturado, uma baixa compressibilidade quando compactado e saturado, uma razoável trabalhabilidade como material de construção e é um solo semipermeável a impermeável quando compactado.

4 PROCEDIMENTO LABORATORIAL

4.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se todos os procedimentos laboratoriais realizados de modo a estudar o efeito do processo de bioestabilização do A25/S75, onde é especificado a preparação dos provetes de solo, a descrição dos ensaios de compressão simples (UCS), dos ensaios edométricos, do ensaio SEM (Scanning Electron Microscopes), da medição dos teores de humidade e da medição do valor do pH das amostras bioestabilizadas.

4.2 Preparação dos provetes de solo

Nesta secção será enumerado todo o material e equipamento utilizado na preparação dos provetes destinados à realização dos ensaios UCS e dos ensaios edométricos. De modo a detalhar a preparação dos provetes entende-se por bem abordar a compactação de cada ensaio e o método de mistura do agente bioestabilizador (Xantano).

4.2.1 Materiais e equipamentos utilizados

De modo a cumprir a norma ASTM D 2166 (2000), tanto nos ensaios UCS como nos ensaios edométricos foi necessário usar um provete em que a relação entre a altura (h) e o diâmetro seja 2 (D), de modo a evitar problemas relacionados com a encurvadura. Atendendo a esta norma, optou-se por usar um tubo de PVC com uma relação 76/38 (h/D) para os ensaios UCS e uma relação 140/70 (h/D) para os ensaios edométricos. Todos os materiais e equipamentos utilizados são enumerados de seguida:

- | | |
|--------------------------------------|------------------------------------|
| - Almofariz | - Etiquetas |
| - Alonga | - Extractor de provetes hidráulico |
| - Balança (limite erro ± 0.001) | - Fita-cola |
| - Balança (limite erro ± 0.01) | - Funil |
| - Base de borracha | - Lápis |
| - Cápsulas | - Luvas |
| - Compactador | - Martelo |
| - Espátulas | - Papel de filtro |

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------|
| - Pás | - Sacos de plástico |
| - Peneiros | - Tabuleiros |
| - Proveta | - Tesoura |
| - Pilão de borracha | - Vaselina |
| - Pilão de compactação leve | - Tubos de PVC 76/38 |
| - Recipiente de grandes dimensões | - Tubos de PVC 140/70 |

4.2.2 Descrição da preparação

A realização da preparação dos provetes para os ensaios UCS e os ensaios edométricos são bastante similares, diferindo apenas no modo de compactação. Importa sublinhar que todo este processo deve cumprir determinados critérios de modo a garantir a homogeneidade e reprodutibilidade das amostras (Correia et al., 2008). O procedimento adoptado na preparação das amostras foi o seguinte:

- i) Fragmentação das partículas de saibro recorrendo a um martelo, submetendo posteriormente a passagem do saibro fragmentado no peneiro nº10, assegurando assim que não existem partículas superiores a 2 mm. As partículas de argila foram desagregadas com o auxílio de um almofariz de borracha e passadas no peneiro nº200, impedindo a passagem de partículas superiores a 0.075 mm.
- ii) Juntou-se 0.750 kg de argila e 2.250 kg de saibro num tabuleiro e através de duas pás misturaram-se as duas partes até se obter um solo homogéneo. Este método foi repetido mais 15 vezes até completar um peso de 48 kg, sendo o solo A25/S75 armazenado num recipiente de grandes dimensões.
- iii) Transferiu-se 1.5 kg de solo num tabuleiro, introduzindo-se de imediato na estufa por um período de 24 horas.
- iv) Preparação dos moldes de PVC cilíndricos de duas dimensões distintas, como mencionado em 4.2.1. Dispondo-se de um papel de filtro e de um lápis, foi traçado no papel a correspondente dimensão circular do tubo PVC e com o auxílio de uma tesoura este foi recortado. De seguida, colocou-se fita-cola no fundo do tubo, onde posteriormente foi inserido por dentro o pedaço de papel recortado. Para finalizar este passo, aplicou-se um pouco de vaselina nas paredes internas dos tubos de modo a diminuir o atrito lateral entre estas e o solo, facilitando assim a futura extracção do provete.
- v) Retirou-se o tabuleiro da estufa passado as 24 horas, deixando-se arrefecer por 1 hora.

vi) De imediato misturou-se o agente bioestabilizador (Xantano) no solo. Este processo é descrito na secção 4.2.3.

vii) Introduziu-se a quantidade de água correspondente ao teor óptimo calculado em 3.5 no solo através de uma proveta. Posteriormente, misturou-se a água com o solo através de uma pá e uma espátula até a água se envolver por completo com o solo.

viii) Seguidamente, deu-se início à compactação da amostra por camadas aplicando a mesma energia de compactação usada no Ensaio de Proctor Normal. Este processo é especificado em 4.2.4.

ix) Por último, os provetes com a amostra compactada foram introduzidos dentro de um saco de plástico devidamente identificados (dia, tempo de cura, e dosagem de Xantano) e armazenados na câmara húmida por um período correspondente ao tempo de cura.

4.2.3 Método de mistura do agente bioestabilizador

Neste ponto é abordado o método adoptado para misturar o Xantano (facultado pelo DEC-FCTUC) com o solo. O método seco é aquele que proporciona melhores resultados (Chang et al., 2015) e, por isso mesmo, optou-se por utilizar essa mesma técnica no presente trabalho. No Quadro 4.1 estão resumidas as diferentes dosagens adoptadas na realização desta dissertação e a respectiva massa, expressa em gramas, de Xantano. De salientar que as percentagens destas dosagens são sempre em relação a 1.5 kg de solo.

Quadro 4.1 – Diferentes dosagens e respectiva massa em gramas para preparar 1.5 kg de solo.

Dosagem (%)	Peso em gramas (gr)
0.25	3.75
0.5	7.5
1	15
1.5	22.5
2	30

Após a concretização do ponto v) da descrição da preparação da amostra (4.2.4) procedeu-se à mistura do Xantano com o solo, respeitando os seguintes passos (ilustrados na Figura 4.1):

i) Retirou-se, cuidadosamente, o Xantano da embalagem com uma espátula, e colocou-se num pequeno recipiente de vidro, que foi sendo pesado até se obter a quantidade pretendida.

ii) Seguidamente, esta quantidade de Xantano foi depositada sobre o peneiro #100 que através de movimentos de translação e rotação foi espalhada por toda a superfície do solo,

distribuindo assim o biopolímero de uma maneira uniforme. As partículas de maiores dimensões retidas no peneiro foram, posteriormente, espalhadas por todo o tabuleiro.

iii) Por fim, com o auxílio de uma pá e de uma espátula misturou-se bem as duas partes até o solo ficar homogéneo.

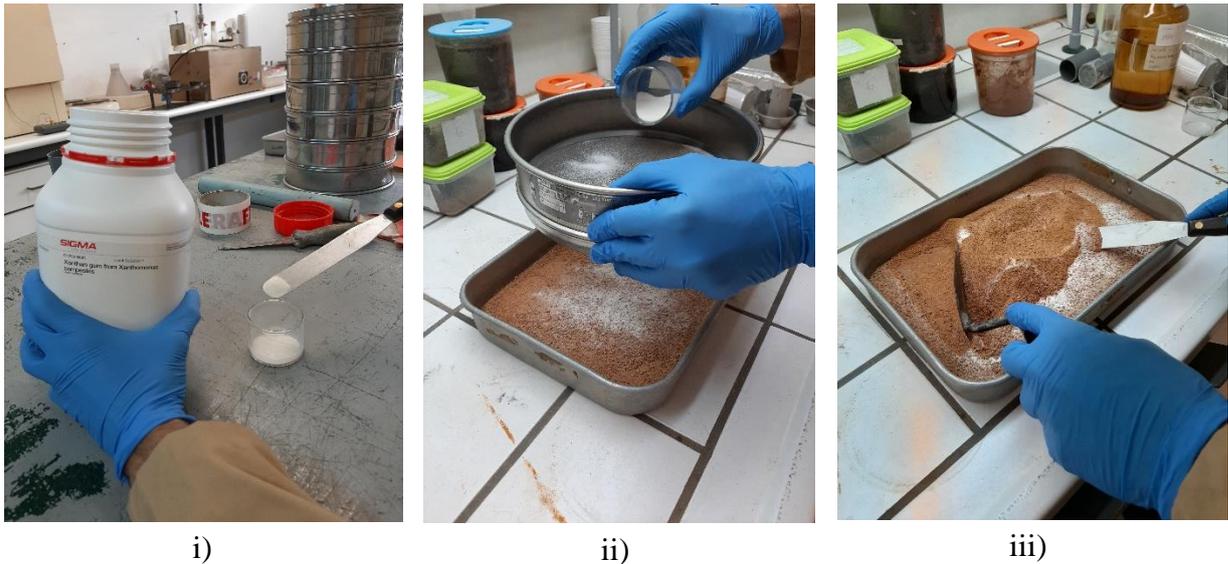


Figura 4.1 - Procedimento do método de mistura do agente bioestabilizador no solo.

4.2.4 Compactação dos provetes

Após a mistura do teor de água no solo (ponto vii) em 4.2.2) procede-se à compactação dos provetes, existindo algumas diferenças na preparação dos provetes usados no ensaio UCS e no ensaio edométrico, nomeadamente a nível da dimensão do tubo de PVC, na quantidade de solo introduzido e no número de pancadas aplicadas entre as camadas. De frisar que a compactação dos provetes de solo foi efectuada com a mesma energia de compactação utilizada no ensaio de Proctor Normal (leve), de modo a assegurar o peso volúmico seco máximo. O método de compactação usado para os provetes de solo destinados aos ensaios UCS foi o seguinte:

- i) Utilizou-se um suporte onde se colocou o tubo de PVC 76/38 (h/D) incorporado por uma alonga.
- ii) Transferiu-se uma determinada quantidade de solo de modo a formar a primeira camada, usando um funil no topo da alonga, evitando assim desperdícios.

iii) Colocou-se um pilão por dentro da alonga em contacto com o solo e, com o auxílio de um compactador, deu-se o número de pancadas necessárias de modo a garantir a energia de compactação desejada.

Os pontos ii) e iii) foram repetidos mais 2 vezes de modo a formar um total de 3 camadas (60 gr de solo por camada) em que o número de pancadas aplicadas foram (2+2+3=7). Este procedimento está ilustrado na Figura 4.2.

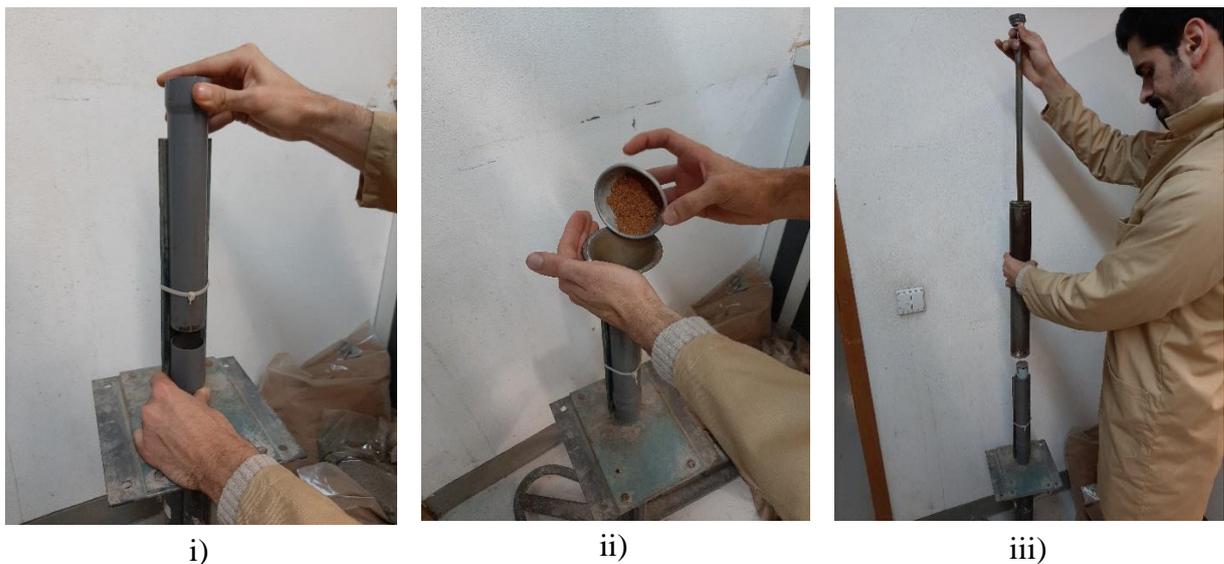


Figura 4.2 – Compactação dos provetes para o ensaio UCS.

De uma forma análoga, os provetes de solo para o ensaio edométrico foram compactados do seguinte modo:

- i) Foi colocado o tubo de PVC (140/70) por cima de uma base de borracha fixa no chão.
- ii) Procedeu-se à transferência de uma determinada quantidade de solo de modo a formar a primeira camada.
- iii) Através de um compactador, compactou-se o solo. Devido ao facto do diâmetro do tubo de PVC ser maior que o diâmetro do compactador deve-se certificar que toda a área do solo é compactada.

Os pontos ii) e iii) foram repetidos mais 2 vezes de modo a formar um total de 3 camadas (250 gr de solo por camada) em que o número de pancadas aplicadas foram (14+14+14=42). Este procedimento está ilustrado na Figura 4.3.

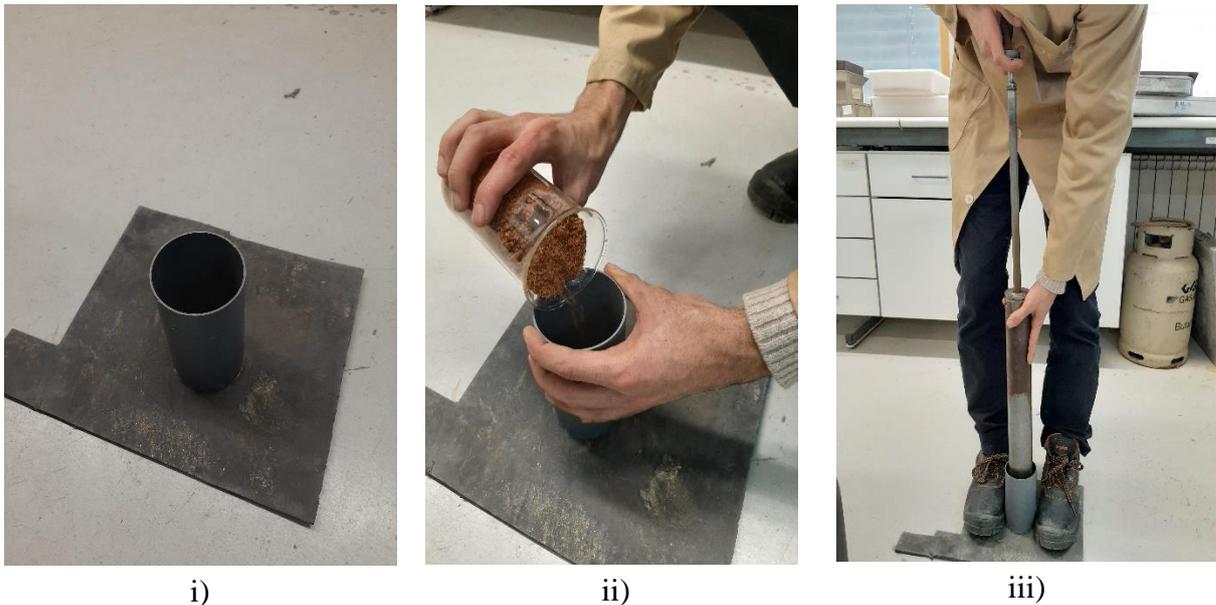


Figura 4.3 – Compactação dos provetes para o ensaio edométrico.

4.3 Ensaio de compressão simples não confinada (UCS)

Esta secção descreve todo o procedimento do ensaio de compressão simples (UCS) de acordo com a Norma BS 1377-7 (1990) e o respectivo tratamento de dados, dos quais é possível extrair a resistência à compressão simples não confinada (q_u) e o módulo de deformabilidade (E_{u50}).

4.3.1 Descrição do equipamento

O equipamento responsável pela execução deste ensaio foi a prensa WYKEHAM FARRANCE LTD Tristar 5000kg Stepless Compression Test Machine, que se encontra ilustrada e legendada na Figura 4.4.



Legenda da prensa:

- 1 – Célula de carga
- 2 – Transdutor de deslocamento
- 3 – Base rígida
- 4 – Dispositivo responsável por iniciar/finalizar o ensaio (on/off), pela alteração da velocidade de deformação e pelo ajuste de altura da base rígida

Figura 4.4 - Legenda da prensa usada nos ensaios UCS.

4.3.2 Descrição do ensaio UCS

Para a obtenção dos parâmetros de resistência mecânica do solo em estudo foi necessário definir previamente a velocidade de deformação da amostra, optando-se por uma velocidade de 1%/min em relação à altura do provete, ou seja 0.76mm/min. Este valor cumpre a Norma ASTM D 2166 (2000) que recomenda um valor de velocidade entre 0.5% e 2%/min em relação à altura da amostra.

O procedimento adoptado baseou-se na aplicação dos seguintes passos (ilustrados na Figura 4.5):

- i) Após a conclusão do tempo de cura planificado, retirou-se o provete da câmara húmida e removeu-se a fita-cola e o papel de filtro da sua base.
- ii) Extraíu-se o provete de solo do tubo de PVC através de um extractor hidráulico. Antes da extracção, foi necessário ajustar a altura das placas e do anel do extractor, de modo a ser possível inserir o pilão.
- iii) Posicionou-se o provete na prensa de ensaio, centrando-o em relação à célula de carga de maneira a, posteriormente, a carga ser aplicada no centro geométrico do topo do provete. A placa de topo é colocada sobre o provete, ficando o mais próximo possível da célula de carga, sem que exista contacto entre eles.

iv) Iniciou-se o ensaio de compressão, sendo os valores da carga exercida no provete medidos pela célula de carga e os deslocamentos medidos pelo transdutor registados num computador através do software TRIAX.

v) Deu-se o ensaio por encerrado no momento em que o provete se encontra no troço descendente da curva tensão-extensão.

vi) Foram gravados todos os dados registados pelo software TRIAX.

vii) Por fim, removeu-se o provete de solo ensaiado e repartiu-se em 3 porções, em que as extremidades foram destinadas para as medições do pH e para a realização do ensaio SEM, enquanto a parte intermédia foi usada para a medição do teor de humidade.



i)



ii)



iii)



iv)



v)



vi)



vii)

Figura 4.5 – Procedimento do ensaio UCS

4.3.3 Tratamento de dados

Tendo em conta as dimensões geométricas iniciais do provete (a altura (h) e o diâmetro da secção transversal (D)) e com base nos resultados obtidos através do programa TRIAX do ensaio descrito em 4.3.1, nomeadamente a carga aplicada no provete medida pela célula de carga e os deslocamentos verticais contabilizados pelo transdutor de deslocamentos, foi possível elaborar um gráfico tensão – extensão.

Este gráfico foi construído através de uma folha de cálculo no Excel de modo a extrair a resistência máxima à compressão e o módulo de deformabilidade. A extensão (ε_a) quantifica-se pelo quociente entre a deformação volumétrica vertical e a altura do provete, expressa em percentagem, como descreve a Eq. 4.1. A área da secção transversal foi corrigida, de acordo com a Eq. 4.2, devido ao facto de existirem deformações radiais no provete durante o ensaio (Head, 1982). Por fim, calcula-se a resistência à compressão não confinada (q_u) através do quociente da carga aplicada (F) pela área corrigida da secção transversal (A_c) (Eq. 4.3).

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta\delta_v}{h} \times 100 \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Em que:

$\Delta\delta_v$ – Variação do deslocamento vertical

h – Altura do provete

$$A_c = \frac{\pi \times D^2}{4\left(1 - \frac{\varepsilon_a}{100}\right)} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Em que:

D – Diâmetro inicial da área transversal do provete

ϵ_a – Extensão axial

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

Após a construção da curva tensão – extensão foi extraído o valor do parâmetro de resistência à compressão simples não confinado máxima, que corresponde ao momento em que o provete entra em rotura. Importante ainda definir o ponto no gráfico que representa 50% deste último parâmetro (q_{u50}) e a correspondente extensão axial (ϵ_{a50}) de modo a calcular o módulo de deformabilidade (E_{u50}). Este parâmetro representa o declive entre esse ponto e a origem, tendo sido calculado pela Eq. 4.4.

$$E_{u50} = \frac{q_{u50}}{\epsilon_{a50}} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Outro aspecto a ter em conta neste tipo de ensaios é a correcção de “bedding errors”, que se caracterizam por na zona inicial do gráfico tensão – extensão ($\sigma - \epsilon$) apresentarem variações de deformações quando existe uma mínima variação de tensão. Este tipo de erros surgem devido ao ajuste inicial do aparelho de medição e devem ser eliminados de forma a não interferir nas características da curva de ensaio, como ilustra a Figura 4.6.

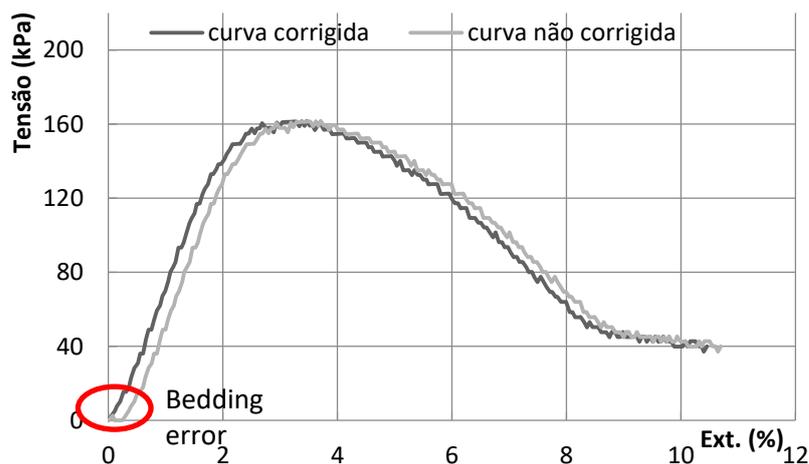


Figura 4.6 – Bedding – error.

4.4 Ensaio edométrico

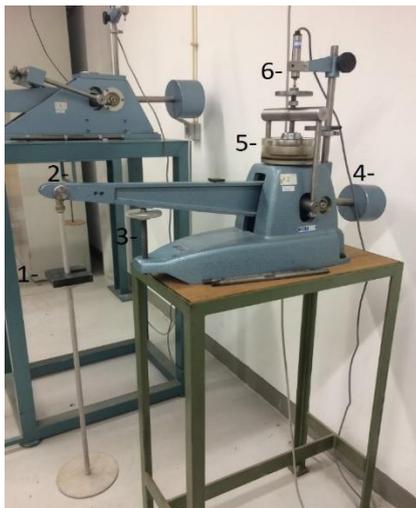
Este ensaio foi executado obedecendo à Norma BS 1377-5 (1990) com o objectivo de extrair os parâmetros relativos à compressibilidade do solo e o coeficiente de consolidação.

Descreve-se, de seguida, o equipamento utilizado neste ensaio, bem como a montagem da amostra e todo o procedimento adoptado.

4.4.1 Descrição do equipamento

Para a realização deste ensaio foram usados edómetros de pequena capacidade atendendo à carga máxima aplicada. Este equipamento é constituído por um suporte de colocação de pesos, um braço da alavanca, um parafuso que impossibilita o movimento da alavanca, uma célula edométrica, um transdutor de deslocamento que mede as deformações e um contrapeso. O aparelho onde se introduz a amostra para estudo é a célula edométrica, que é composta por duas pedras porosas (inferior e superior), um anel edométrico, uma placa de topo (peça para distribuir a carga uniformemente por toda a área da amostra) e a peça de fixação do anel.

Na Figura 4.7 encontram-se legendados os objectos supramencionados usados no ensaio edométrico.



Legenda do edómetro:

- 1 – Suporte de colocação de pesos
- 2 – Braço da alavanca
- 3 – Parafuso para impedir o movimento da alavanca
- 4 – Contra-peso
- 5 – Célula edométrica
- 6 – Transdutor de deslocamentos para registo automático de deformações

a)



Legenda da célula edométrica:

- 1 – Célula edométrica
- 2 – Anel edométrico
- 3 – Pedra porosa superior
- 4 – Placa de topo
- 5 – Peça de fixação do anel

b)

Figura 4.7 - Descrição do: a) edómetro ; b) Célula edométrica

4.4.2 Descrição da montagem da amostra

De modo a inserir a amostra na célula edométrica foi preciso, previamente, proceder-se cuidadosamente à montagem da amostra, garantindo a integridade desta. De seguida apresenta-se o procedimento utilizado na montagem das amostras e posteriormente ilustrado na Figura 4.8:

- i) Retirou-se o provete da câmara húmida após o tempo de cura e removeu-se a fita-cola, o papel de filtro da base do provete e cravou-se o anel edométrico no topo do provete. Ajustou-se a altura das placas do extractor hidráulico e através deste, retirou-se uma parte do provete (de modo a preencher toda a altura do anel edométrico).
- ii) Através de uma espátula cortou-se, cautelosamente, essa parte do provete, de modo a não danificar a amostra que se encontra no interior do anel edométrico.
- iii) De seguida, alisou-se a face superior e inferior da amostra no anel edométrico com o auxílio da mesma espátula.
- iv) Os restos de amostra que sobraram do alisamento explicado no passo anterior foram usados para a medição do teor de humidade.
- v) O anel edométrico foi colocado sobre uma base em borracha e foi registado o peso do conjunto anel + amostra + borracha.
- vi) Colocou-se no interior da célula edométrica o anel edométrico com a amostra entre as pedras porosas (inferior e superior) saturadas. Introduziu-se um papel de filtro molhado para separar as pedras porosas da amostra, na face inferior e superior.
- vii) Foi inserido a peça de fixação do anel, previamente revestida com vaselina de maneira a facilitar a sua remoção no final do ensaio.
- viii) Por fim, foi colocada a placa de topo na célula edométrica, tendo sido esta completamente saturada.
- ix) Encaixou-se a célula edométrica no edómetro e posteriormente posicionou-se a haste por cima da célula, de modo a transmitir a carga depositada na alavanca para a amostra. Para impedir inclinações da haste foi verificado a horizontalidade da haste com recurso a um nível. Colocou-se de imediato o transdutor de deslocamentos para o registo de deformações automáticas sobre a haste.



i)



ii)



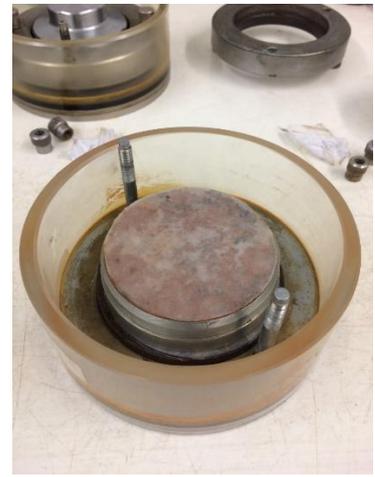
iii)



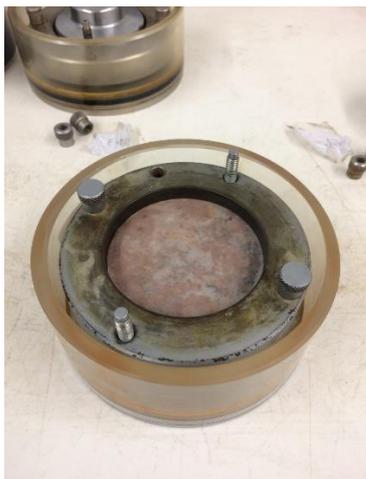
iv)



v)



vi)



vii)



viii)



ix)

Figura 4.8 – Ilustração do procedimento da montagem da amostra.

De referir ainda que durante todo o ensaio (explicado em 4.4.3) foi necessário introduzir água ao longo do tempo no interior da célula edométrica através de um esguicho de modo a garantir a total saturação da amostra.

4.4.3 Descrição do ensaio edométrico (consolidação)

Para a concretização de todos os ensaios foram utilizados 4 edómetros e 4 células edométricas diferentes. Antes da sua realização, registou-se e associou-se a cada edómetro o peso de anéis edométricos, placas de topo, cápsulas e borrachas. Após a instalação da célula edométrica no edómetro foi possível dar início ao carregamento da amostra, onde os pesos foram aplicados no braço de carga da alavanca com factor multiplicativo de 11.04.

A fase de carregamento foi efectuada por 8 patamares, em que cada patamar teve uma duração de aproximadamente 3 horas (suficiente para garantir a total dissipação de pressão neutra). Este carregamento consistiu na aplicação de uma carga inicial de 0.250 kg, que foi sendo duplicada até aos 32 kg. Após concluído este patamar, iniciou-se a fase de descarga em que se foi reduzindo a carga para um quarto da carga precedente, havendo portanto 4 patamares de descarga. Durante todo o ensaio, as deformações da amostra em relação ao tempo foram medidas pelo transdutor de deslocamentos e, através do programa TRIAX, estes valores foram registados e posteriormente gravados. A sequência dos intervalos de tempos foram os seguintes: 3, 5, 30, 120 segundos durante respectivamente 2, 5, 8, 15 minutos, deixando-se até ao final do patamar a registar com um intervalo de 300 segundos, devido ao facto de existirem menores deformações nos instantes finais nos diferentes patamares.

No final de cada ensaio foi retirado o anel edométrico da célula edométrica e colocado numa cápsula, registando-se o peso do conjunto anel edométrico + amostra húmida + cápsula. Este foi introduzido na estufa durante 24 horas para se proceder à sua secagem. Após a sua secagem, transferiu-se o conjunto para o exsiccador onde permaneceu, aproximadamente, durante 1 hora. De seguida, registou-se o peso do conjunto anel edométrico + amostra seca + cápsula. Tendo conhecimento do peso de todos os conjuntos anteriormente mencionados e de todos os seus elementos (anel edométrico, borracha e cápsula) foi possível retirar os pesos dos provetes húmidos e secos e, por fim, calcular o respectivo teor de humidade final.

4.5 Medição do teor de humidade dos provetes dos ensaios UCS

Tal como referido no ponto vii) em 4.3.2, parte do provete foi utilizado para determinar o teor de humidade. De imediato, registou-se o peso da porção do provete húmido colocada numa cápsula (m_2), esta previamente pesada (m_1). Depois, procedeu-se à secagem do provete, mantendo-se a amostra cerca de 24 horas na estufa. Seguidamente, foi retirado e introduzido num exsiccador durante 1 hora, tendo sido posteriormente pesado (m_3). Conhecendo todas as

pesagens anteriormente mencionadas e através da Eq. 4.6 determinou-se o teor de humidade (w) de cada provete.

$$w = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100 \quad (\text{Eq. 4.6})$$

As medições dos teores de humidade (w) dos vários provetes encontram-se dispostas no Quadro B.1.

4.6 Medição do teor de humidade dos provetes dos ensaios edométricos

Após a colocação dos restos de amostra (explicado em 4.4.2) numa cápsula, seguiu-se a mesma metodologia aplicada em 4.5. As medições de todos os provetes ensaiados apresentam-se no Quadro B.2.

4.7 Medição do valor do pH dos provetes bioestabilizados após o ensaio UCS

Após a conclusão do ensaio UCS dos provetes bioestabilizados procedeu-se à medição do pH destas amostras. Tal como na medição efectuada ao solo não tratado na secção 3.6 seguiu-se a Norma BS 1377-3 de 1990 da British Standard. Todas as medições encontram-se expostas nos Quadros 5.1 e 5.3.

4.8 Ensaio SEM (Scanning Electron Microscopes)

Este ensaio foi efectuado com a finalidade de confirmar a existência do biopolímero Xantano nas amostras de solo bioestabilizado, servindo também para comparar as amostras do solo tratado e não tratado a nível estrutural e químico. Para a realização deste ensaio foi utilizado um microscópio electrónico Zeiss Merlin Gemini II (Figura 4.9), nas instalações do IPN.

O procedimento deste ensaio iniciou-se com a aplicação de uma camada de ouro (Au) sobre as amostras, com a intenção de melhorar o seu potencial condutor. Seguidamente, com recurso ao microscópio supracitado, realizou-se um varrimento de um raio de electrões onde posteriormente se captou imagens ampliadas da estrutura da amostra e do seu perfil químico.



Figura 4.9 – Equipamento utilizado na realização do ensaio SEM.

4.9 Plano de ensaios

Nesta secção encontra-se traçado o plano relativo à realização dos ensaios necessários para a execução da presente investigação, nomeadamente, a dosagem do agente estabilizador adoptado e o tempo de cura escolhido de modo a analisar o efeito da bioestabilização no solo A25/S75. Apresentou-se, para cada tipo de ensaio, o número de provetes ensaiados e o número de medições ao teor de água examinadas a cada provete. Adicionalmente, foi referido o número de medições de pH por provete, no ensaio UCS. Todos estes dados encontram-se especificados no Quadro 4.2.

O nome dado aos ensaios segue sempre um raciocínio análogo, por exemplo, no caso do ensaio XG_TC3: XG exprime a abreviação de “Xanthan Gum” enquanto TC3 significa que o provete foi submetido a um tempo de cura de 3 dias. No caso de XG_025, 025 expressa a dosagem (0.25%) aplicada nesse ensaio.

Quadro 4.2 – Plano de ensaios.

Nome	Dosagem de Xantano (%)	Tempo de cura (dias)	Ensaio UCS			Ensaio edométrico	
			Nº de provetes ensaiados (un)	Nº de medições de teor de água/prov	Nº de medições de pH/prov	Nº de provetes ensaiados (un)	Nº de medições de teor de água/prov
SE	0	0	3	1	1	2	1
XG_TC3	1	3	3	1	1	2	1
XG_TC7	1	7	3	1	1	2	1
XG_TC14	1	14	3	1	1	2	1
XG_TC28	1	28	3	1	1	2	1
XG_025	0.25	14	3	1	1	2	1
XG_050	0.5	14	3	1	1	2	1
XG_150	1.5	14	3	1	1	2	1
XG_200	2	14	3	1	1	2	1

5 DISCUSSÃO E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo pretende-se apresentar e discutir os diversos parâmetros extraídos dos ensaios realizados e explicados na secção 4 de forma a estudar o processo de estabilização do solo A25/S75 na presença do Xantano, analisando o efeito do tempo de cura em câmara húmida (3, 7, 14, 28 dias) e a variação da dosagem do Xantano (0%, 0.25%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2%) no solo estabilizado.

De forma resumida, os parâmetros abordados e discutidos no âmbito do presente trabalho são: a resistência à compressão não confinada (q_u), o módulo de deformabilidade correspondente a 50% da tensão de rotura (E_{u50}), o índice de compressibilidade (C_c), o índice de recompressibilidade (C_r), a tensão de cedência (σ'_p), o coeficiente de consolidação (C_v) e o valor do pH do solo estabilizado devido à presença do Xantano. Complementarmente, apresentam-se os resultados do ensaio SEM (Scanning Electron Microscopes) com o objectivo de identificar a presença deste biopolímero responsável pela estabilização do solo em estudo.

5.1 Efeito da variação do tempo de cura em câmara húmida

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

A Figura 5.1 apresenta a relação entre a tensão e a extensão (q_u - ϵ_a) para o solo estabilizado devido à presença do Xantano para os diferentes tempo de cura (3, 7, 14 e 28 dias). Segundo a mesma Figura 5.1 é notório o aumento da resistência à compressão para tempos de cura superiores, continuando o solo a exibir um comportamento frágil, com diminuição de resistência após rotura.

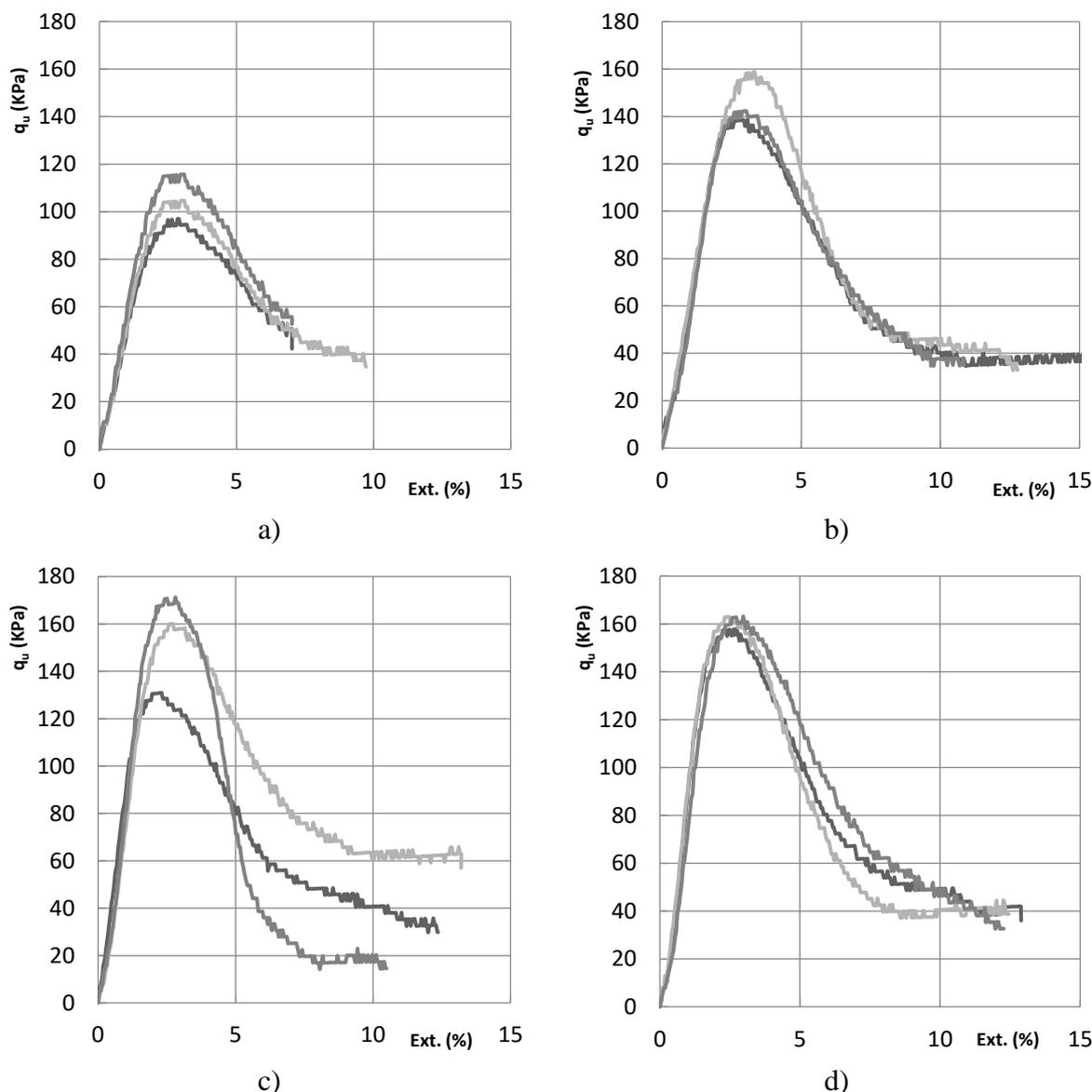


Figura 5.1 - Gráficos tensão-extensão (q_u - ϵ_a) para os provetes estabilizados com 1% de Xantano com tempos de cura crescentes em câmara húmida: a) 3 dias; b) 7 dias; c) 14 dias e d) 28 dias.

A Figura 5.2 mostra que o aumento do tempo de cura induz no solo estabilizado o aumento da resistência à compressão e do módulo de deformabilidade para uma dosagem de Xantano de 1%, registando-se uma evolução mais acentuada nos primeiros 14 dias de cura, registando-se entre 14 e 28 dias de cura uma atenuação da melhoria das propriedades mecânicas. Estes resultados corroboram os estudos de Lee et al. (2019) e de Cabalar et al. (2017). De realçar que nos primeiros 3 dias de cura existe um decréscimo da resistência à compressão e do módulo de deformabilidade em relação ao solo não tratado (linha a tracejado), possivelmente devido à forte capacidade de retenção de água dos hidrogéis formados pelo Xantano retardando a desidratação (Lee et al., 2019).

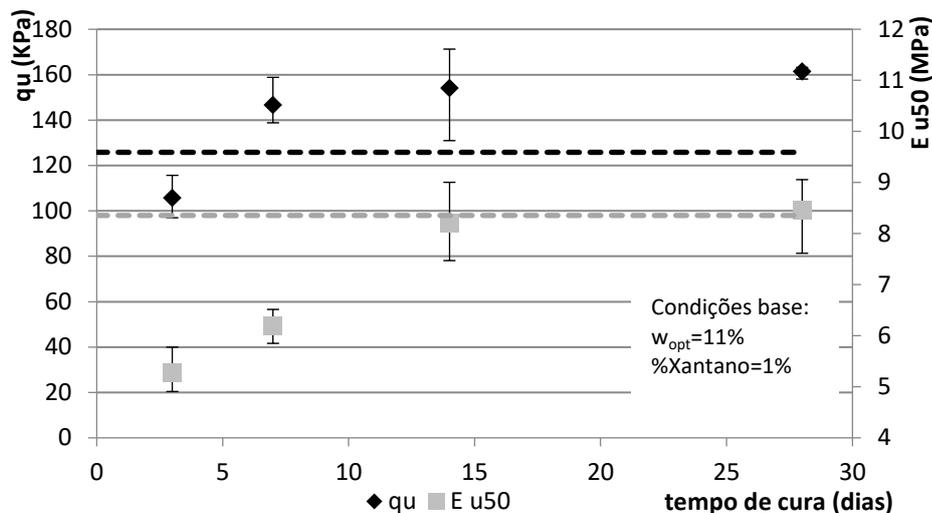
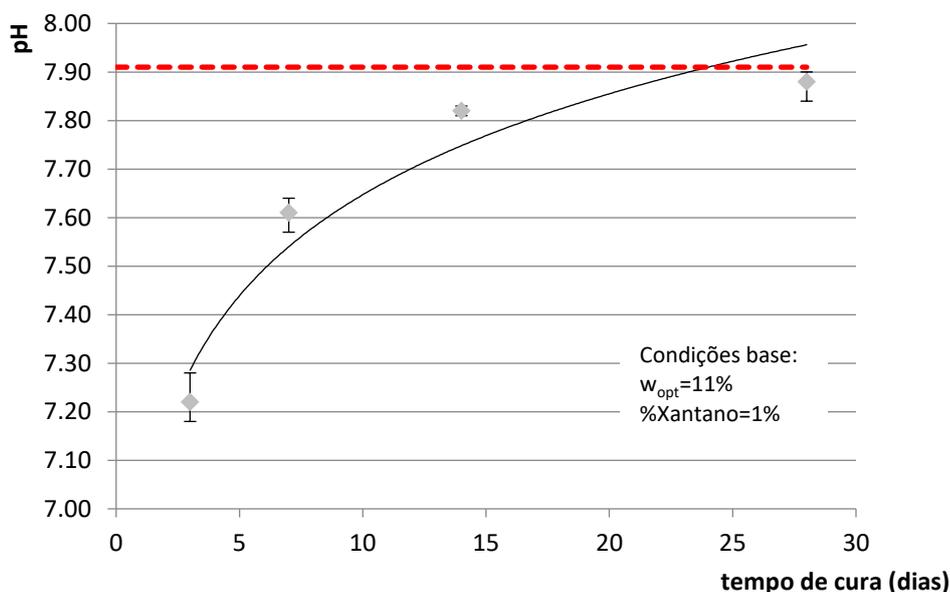


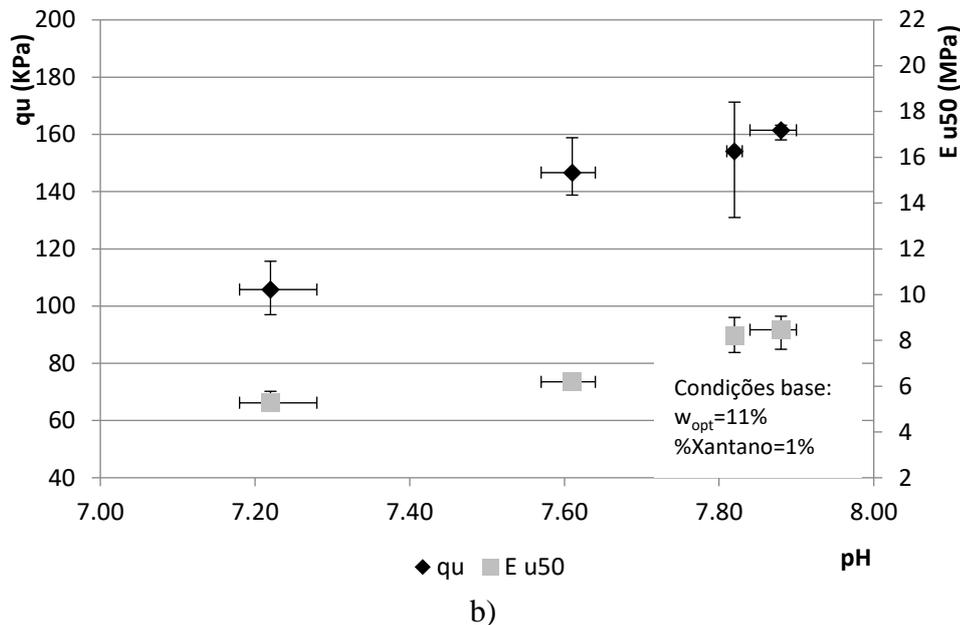
Figura 5.2 - Resistência à compressão não confinada (q_u) e módulo de deformabilidade (E_{u50}) vs tempo de cura em câmara húmida (3,7,14 e 28 dias).

5.1.2 Valores do pH do solo bioestabilizado

A Figura 5.3 a) mostra os valores do pH do solo estabilizado para os diferentes tempos de cura, para uma dosagem de Xantano de 1%. Os resultados indicam uma evolução crescente do parâmetro supramencionado com o aumento do tempo de cura, o qual tende para o valor de pH do solo não estabilizado (linha a tracejado). A Figura 5.3 b) relaciona os valores da resistência à compressão e do módulo de deformabilidade com os valores do pH do solo bioestabilizado, apontando que os parâmetros de resistência do solo são tanto maiores quanto maiores os valores do pH do solo estabilizado devido à presença do Xantano.



a)



b)
Figura 5.3 – a) Valores do pH do solo estabilizado vs tempo de cura (3,7,14 e 28 dias); b) Valores de resistência à compressão (q_u) e módulo de deformabilidade (E_{u50}) vs pH do solo estabilizado.

5.1.3 Parâmetros da compressibilidade do solo

A Figura 5.4 ilustra as curvas edométricas obtidas para o solo estabilizado devido à presença de Xantano para os vários tempos de cura (3, 7, 14 e 28 dias), onde é possível observar que à medida que o tempo de cura aumenta se verifica um aumento no valor do índice de vazios pós-descarga. Para efeito do presente trabalho é extraído o índice de compressibilidade (C_c) e o índice de recompressibilidade (C_r) segundo as equações 2.1 e 2.2, respectivamente. Adicionalmente, é extraído a tensão de cedência (σ'_p) e o coeficiente de consolidação (C_v) através do método de Casagrande e o método de Taylor, respectivamente, com o intuito de estudar a influência do tempo de cura.

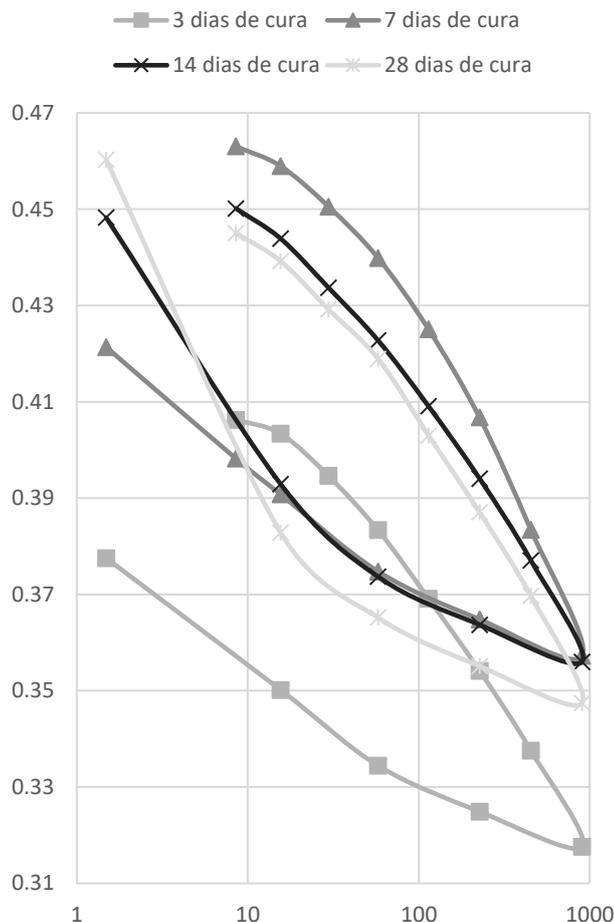


Figura 5.4 - Curvas log $\sigma'_v - e$

A Figura 5.5 ilustra os valores do índice de compressibilidade (C_c) e recompressibilidade (C_r) extraídos das curvas edométricas para os diferentes tempos de cura (com uma dosagem de Xantano de 1%), onde a linha a tracejado representa os valores médios do solo não estabilizado para cada parâmetro. Os resultados sugerem que o índice de recompressibilidade é insensível à variação do tempo de cura, não diferindo relativamente ao solo não tratado. O índice de compressibilidade dos provetes estabilizados é superior ao do solo não tratado e aparenta aumentar ligeiramente com o aumento de tempo de cura, excepto dos 7 para os 14 dias de cura. De notar que existe uma dispersão de resultados semelhantes em todos os ensaios, havendo uma maior disparidade nos valores relativos ao índice de compressibilidade. Estes resultados não corroboram de todo com o estudo realizado por Latifi et al. (2017), em que aponta um decrescimento destes índices com o aumento de tempo de cura.

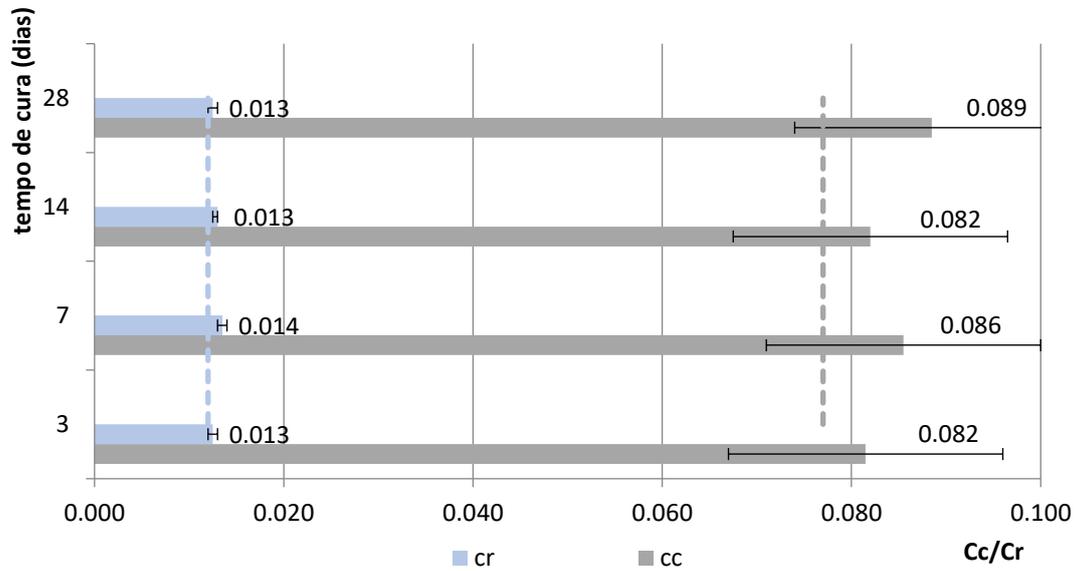


Figura 5.5 - Valores do índice de compressibilidade (C_c) e do índice de recompressibilidade (C_r) vs tempo de cura (3, 7, 14 e 28 dias).

A Figura 5.6 apresenta os valores da tensão de cedência para tempos de cura de 3, 7, 14 e 28 dias para provetes de solo estabilizados com 1% de Xantano. De acordo com a mesma, este parâmetro decresce comparativamente ao solo não tratado (linha a tracejado), mas permanece praticamente constante para os diferentes tempos de cura, mostrando-se insensível à variação da cura em câmara húmida. Estes resultados não corroboram com o estudo de Latifi et al. (2017), que sugere o aumento da tensão de cedência para maiores tempos de cura.

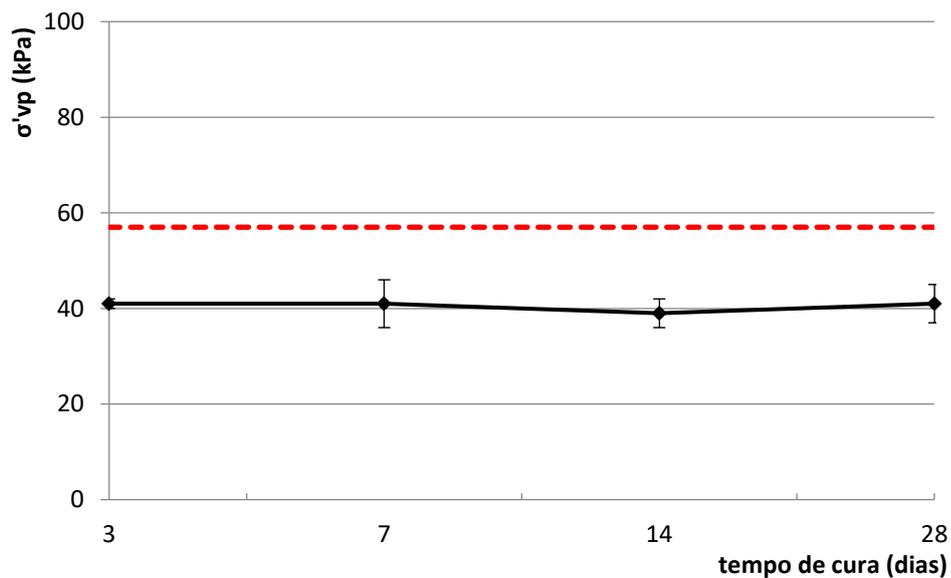


Figura 5.6 - Valores da tensão de cedência vs tempo de cura (para a dosagem estabilizadora base).

5.1.4 Coeficiente de consolidação

Na Figura 5.7 está representado o valor dos coeficientes de consolidação para o escalão de carga (16 kg – 32 kg) e para o escalão de descarga (32 kg – 8 kg) com a evolução do tempo de cura, bem como os resultados relativos ao solo não estabilizado (a tracejado). Relativamente ao escalão de descarga, a variação do parâmetro supramencionado é insensível à variação do tempo de cura. Para o escalão de carga, este parâmetro parece aumentar com o aumento do tempo de cura, excepto dos 14 dias para os 28 dias de cura.

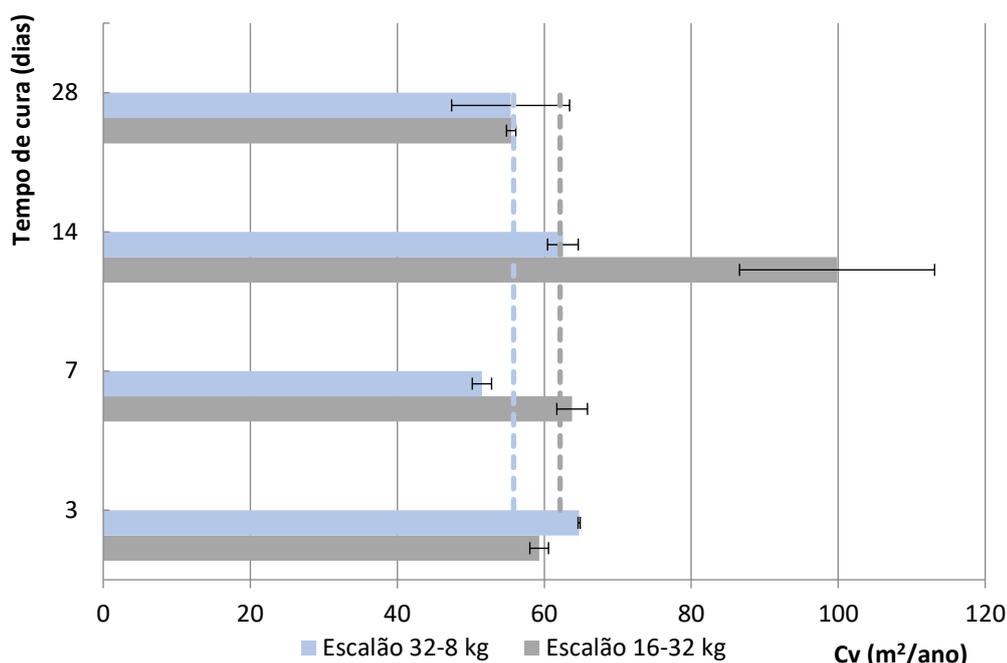


Figura 5.7 – Evolução do parâmetro C_v para dois escalões distintos com a variação do tempo de cura.

5.1.5 Tabelas resumo

O Quadro 5.1 apresenta os valores dos parâmetros associados à resistência de todos os provetes realizados para os diferentes tempos de cura estudados. Complementarmente, são indicados os respectivos valores de pH. O Quadro 5.2 mostra os valores de todos os parâmetros extraídos através da realização dos ensaios edométricos para todos os tempos de cura analisados.

Quadro 5.1 – Valores de pH e dos parâmetros de resistência para todos os tempos de cura analisados.

Nome	Nº do Provete ensaiado	Ensaio UCS				pH	pH médio
		qu máx (KPa)	qu médio (KPa)	Eu50 (MPa)	Eu50 médio (MPa)		
SE	Provete 1	113.79	125.80	6.19	8.36	7.88	7.91
	Provete 2	123.03		8.31		7.91	
	Provete 3	140.58		10.57		7.94	
XG_TC3	Provete 1	96.98	105.77	4.91	5.28	7.28	7.22
	Provete 2	104.68		5.14		7.21	
	Provete 3	115.66		5.78		7.18	
XG_TC7	Provete 1	138.79	146.67	6.20	6.19	7.63	7.61
	Provete 2	142.39		5.85		7.64	
	Provete 3	158.82		6.52		7.57	
XG_TC14	Provete 1	130.94	154.12	9.00	8.20	7.81	7.82
	Provete 2	160.13		7.47		7.83	
	Provete 3	171.28		8.14		7.81	
XG_TC28	Provete 1	158.09	161.45	8.72	8.46	7.89	7.88
	Provete 2	163.02		9.06		7.84	
	Provete 3	163.23		7.61		7.90	

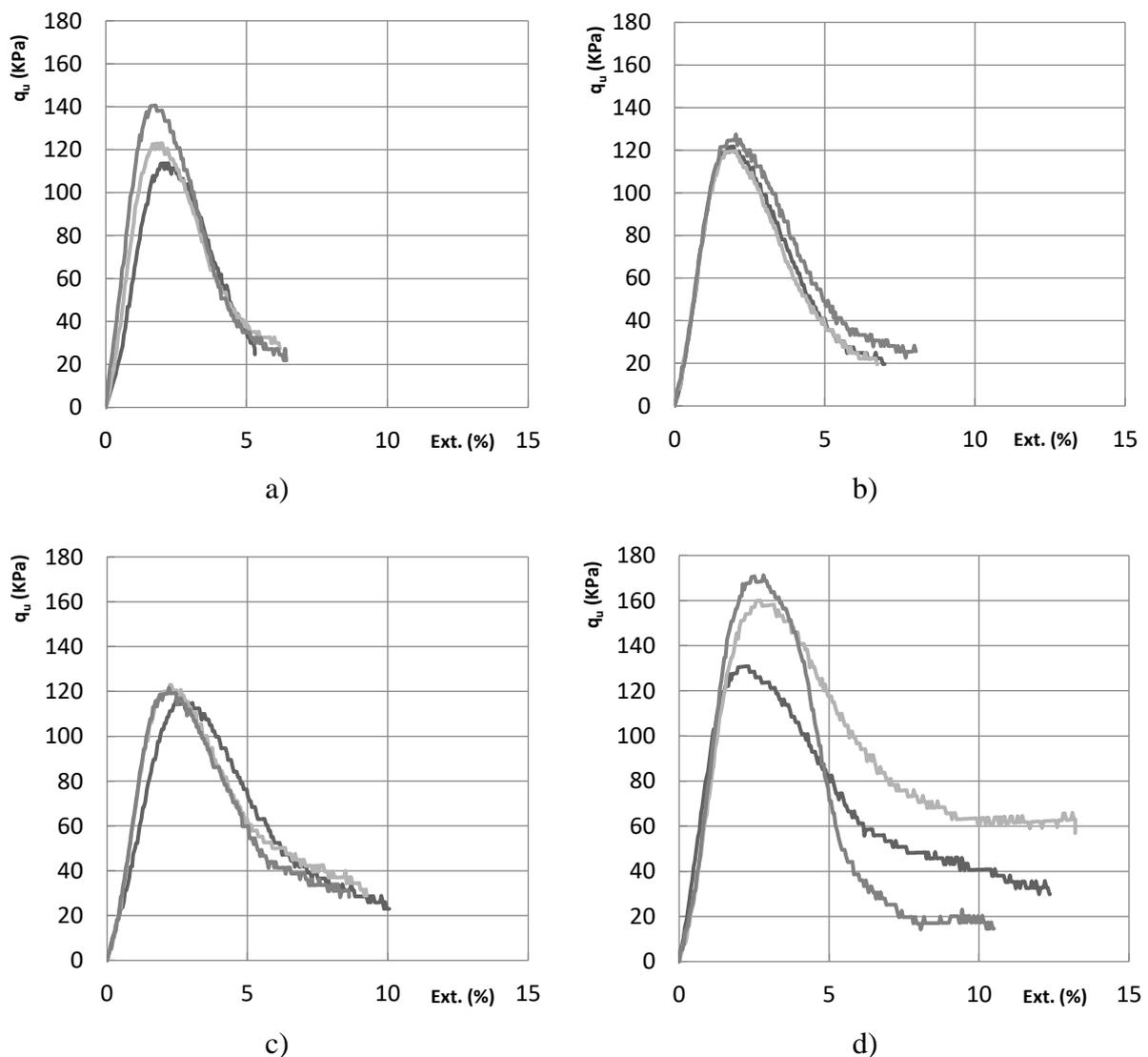
Quadro 5.2 – Valores dos parâmetros extraídos através do ensaio edométrico para diferentes tempos de cura.

Nome	Nº do Provete ensaiado	Ensaio edométrico						
		Cc	Cc médio	Cr	Cr médio	Tensão de cedência (KPa)	Coeficiente de consolidação (Cv)	
							Carga (32Kg) (m ² /ano)	Descarga (8Kg) (m ² /ano)
SE	Provete 1	0.061	0.077	0.011	0.012	60	60.543	59.764
	Provete 2	0.093		0.012		54	63.763	51.900
XG_TC3	Provete 1	0.067	0.082	0.012	0.013	40	60.575	64.892
	Provete 2	0.096		0.013		42	58.038	64.601
XG_TC7	Provete 1	0.083	0.086	0.014	0.014	36	65.881	52.831
	Provete 2	0.088		0.013		46	61.711	50.203
XG_TC14	Provete 1	0.070	0.082	0.013	0.013	36	113.110	64.631
	Provete 2	0.094		0.013		42	86.565	60.447
XG_TC28	Provete 1	0.074	0.089	0.013	0.013	37	56.130	63.439
	Provete 2	0.103		0.012		45	54.863	47.395

5.2 Efeito da variação da dosagem do agente bioestabilizador

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

A Figura 5.8 apresenta as curvas tensão-extensão dos provetes estabilizados com diferentes dosagens de Xantano, para um tempo de cura de 14 dias. Os resultados mostram que o aumento da dosagem do biopolímero supramencionado promove, de uma maneira geral, o aumento da resistência à compressão não confinada (q_u), embora sem repercussão no comportamento tensão – extensão o qual mantém-se frágil.



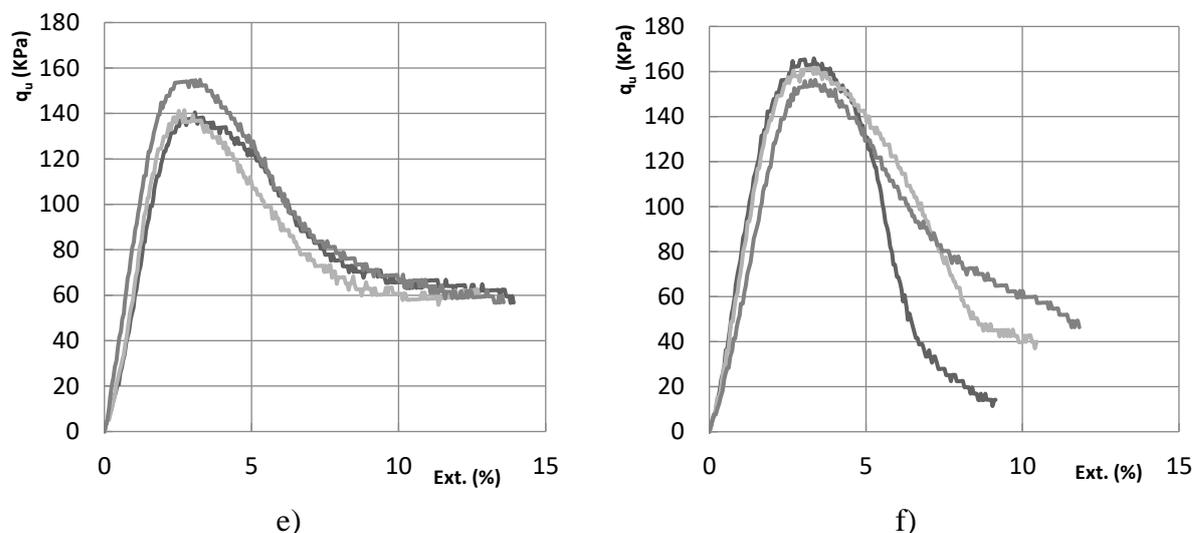
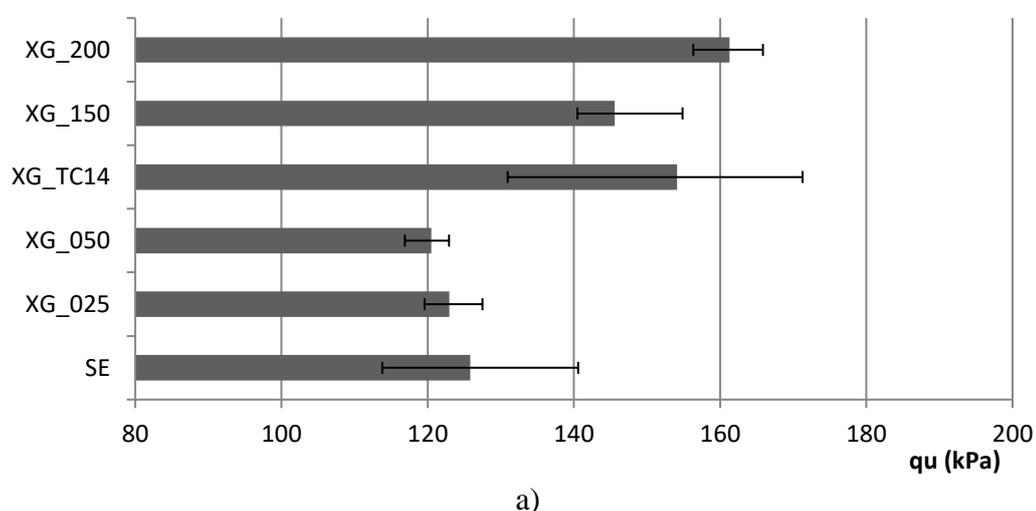
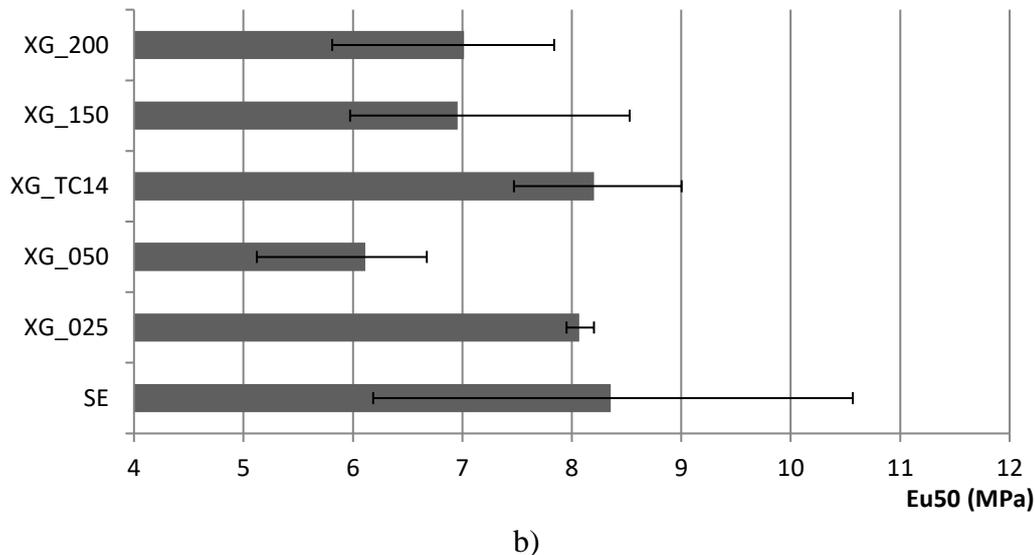


Figura 5.8 - Gráficos tensão-extensão (q_u - ϵ_a) para os provetes estabilizados com 14 dias de tempo de câmara húmida com o aumento de dosagem de Xantano: a) 0%; b) 0.25%; c) 0.5%; d) 1%; e) 1.5% e f) 2%

A Figura 5.9 a) exhibe os valores da resistência à compressão não confinada para os provetes bioestabilizados com uma dosagem crescente de Xantano. Os resultados não permitem observar uma evolução lógica deste parâmetro à medida que a concentração do biopolímero aumenta, no entanto, é possível afirmar que os provetes de maiores dosagens (1%, 1.5% e 2%) apresentam uma resistência superior aos provetes de menores dosagens (0.25% e 0.5%), os quais apresentam valores inferiores relativamente ao solo não tratado. A Figura 5.9 b) ilustra os valores do módulo de deformabilidade do solo A25/S75 bioestabilizado com dosagens crescentes de Xantano. A Figura 5.9 b) sugere que, de uma maneira geral, o módulo de deformabilidade decresce com o aumento da dosagem de Xantano, o que corrobora com os resultados apresentados por Lee et al. (2019) que conclui que o parâmetro supramencionado decresce entre as dosagens de 1% e 2%.





b)
Figura 5.9 - Evolução dos parâmetros mecânicos do solo para os provetes bioestabilizados com uma dosagem crescente de Xantano: a) Resistência à compressão (q_u); b) Módulo de deformabilidade (E_{u50}).

5.2.2 Valor do pH do solo

A Figura 5.10 apresenta os valores do pH do solo bioestabilizado para concentrações de Xantano crescentes. De acordo com a mesma, não é possível concluir uma relação lógica do parâmetro supracitado para as diferentes dosagens de Xantano do solo A25/S75 bioestabilizado.

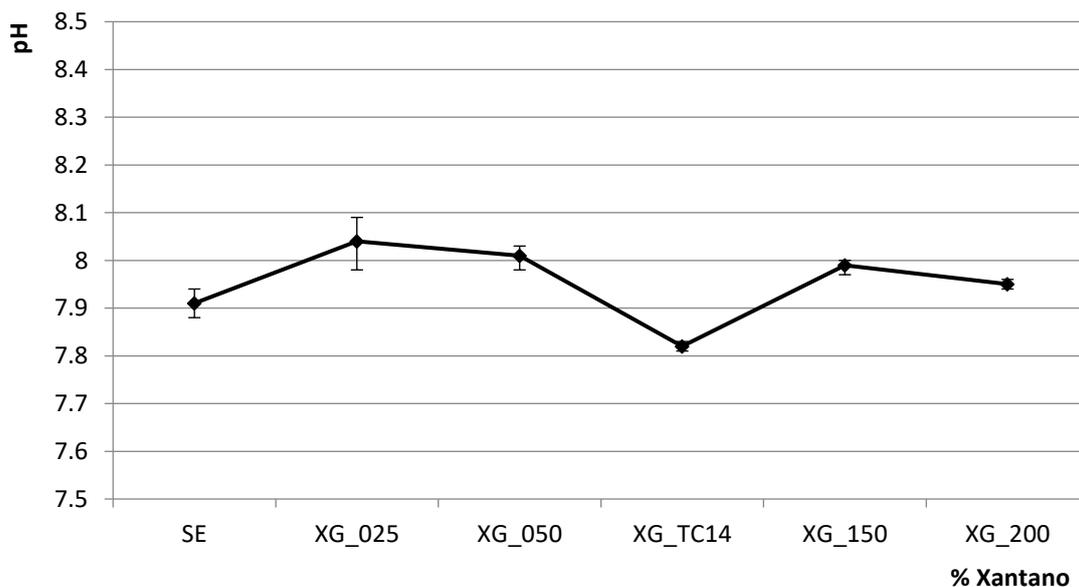


Figura 5.10 - Valores do pH dos provetes bioestabilizados para dosagens de Xantano crescentes.

5.2.3 Parâmetros da compressibilidade do solo

A Figura 5.11 ilustra as curvas edométricas obtidas para o solo estabilizado com diferentes dosagens de Xantano para um tempo de cura em câmara húmida de 14 dias. Através da Figura 5.11 verifica-se que o aumento da dosagem do biopolímero proporciona, em fase de descarga, uma maior expansibilidade no solo, originando um índice de vazios final mais elevado. Para efeito do presente trabalho são extraídos o índice de compressibilidade (C_c) e o índice de recompressibilidade (C_r) segundo as equações 2.1 e 2.2, respectivamente. Adicionalmente, são calculados a tensão de cedência (σ'_p) e o coeficiente de consolidação (C_v) através do método de Casagrande e do método de Taylor, respectivamente.

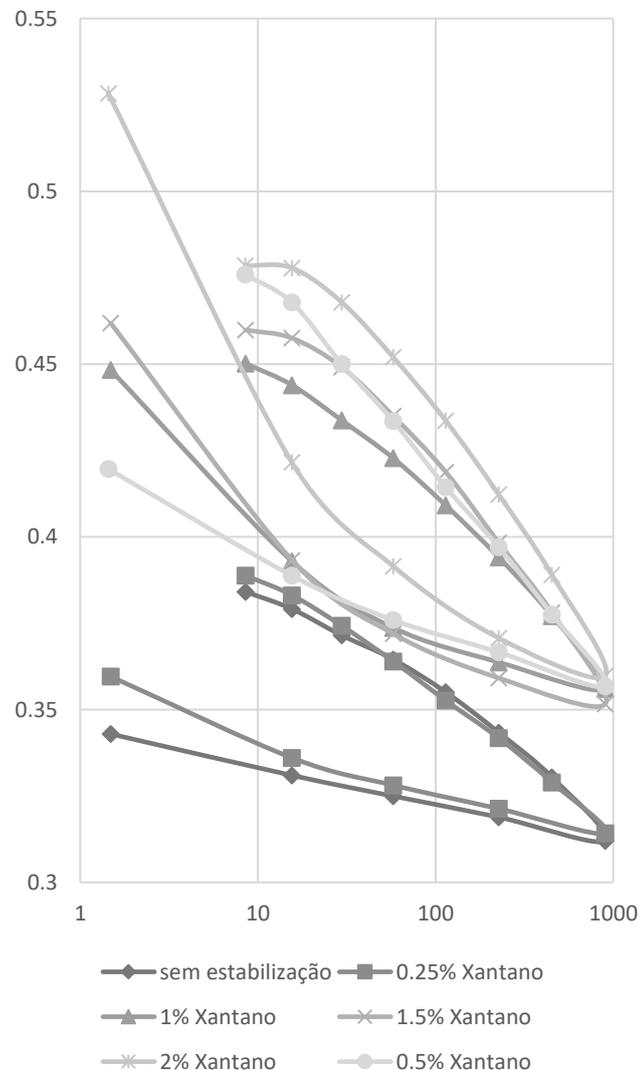


Figura 5.11 - Curvas $\log \sigma'_v - e$ para os provetes bioestabilizados com dosagens crescentes de Xantano.

A Figura 5.12 apresenta a evolução do índice de recompressibilidade e do índice de compressibilidade do solo A25/S75 bioestabilizado com Xantano. De acordo com a mesma, o índice de recompressibilidade permanece praticamente constante para as diferentes dosagens estudadas e o índice de compressibilidade parece aumentar à medida que os provetes são bioestabilizados para maiores dosagens de biopolímero, contudo, os provetes estabilizados com menor dosagem de Xantano (0.25% e 0.5%) apresentam uma diminuição do índice de compressibilidade relativamente ao solo não tratado. Os resultados não corroboram com Kwon et al. (2019) que detectou um aumento no índice de compressibilidade e no índice de recompressibilidade para uma estabilização com 0.5% de Xantano. Estes resultados também não corroboram completamente com Cabalar et al. (2017), dado estes autores terem concluído que os dois índices diminuem com o aumento da dosagem de Xantano, enquanto os resultados da Figura 5.12 mostram esta tendência unicamente para dosagens inferiores a 0.5% de Xantano.

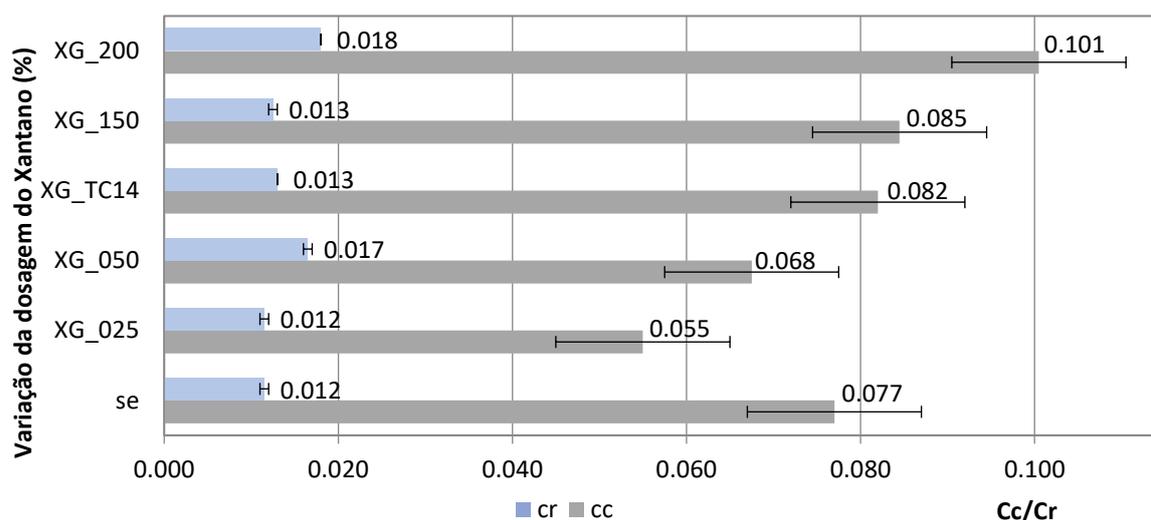


Figura 5.12 - Valores do índice de compressibilidade (C_c) e do índice de recompressibilidade (C_r) para provetes de solo bioestabilizado com dosagens de Xantano crescentes.

A Figura 5.13 mostra a variação da tensão de cedência (σ'_p) para o solo em estudo bioestabilizado com dosagens crescentes de Xantano. Os resultados não permitem afirmar uma evolução lógica do parâmetro supramencionado à medida que o solo é estabilizado com dosagens de Xantano mais elevadas, sugerindo, por isso mesmo, que este parâmetro é insensível à variação da dosagem do biopolímero.

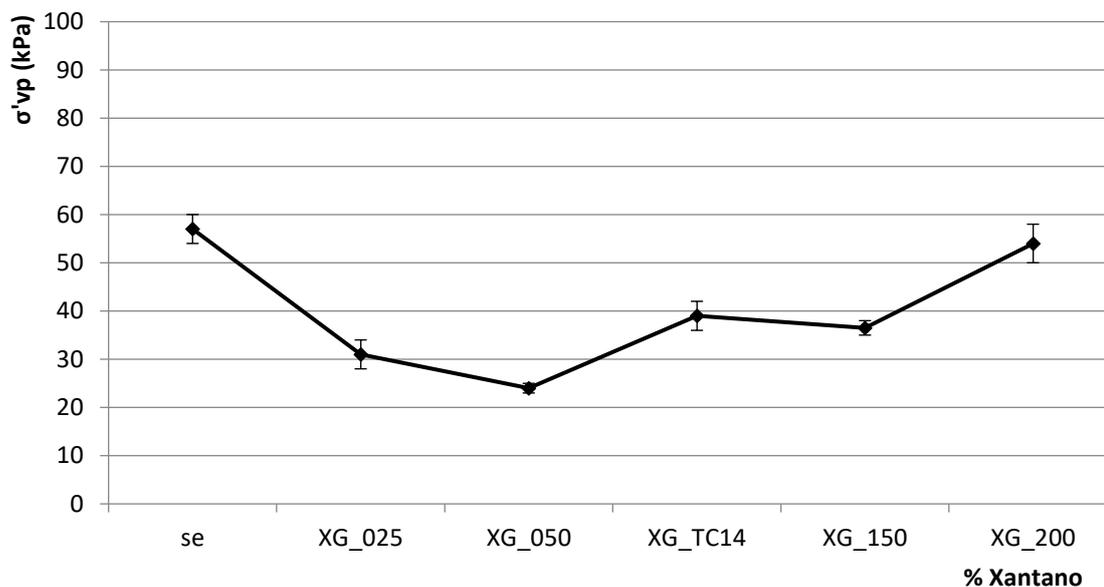


Figura 5.13 - Valores da tensão de cedência para os provetes bioestabilizados com dosagem crescente de Xantano.

5.2.4 Coeficiente de consolidação

Na Figura 5.14 está representado a evolução dos coeficientes de consolidação (C_v) para o escalão de carga (16 kg – 32 kg) e para o escalão de descarga (32 kg – 8 kg) com a variação da dosagem do biopolímero. No escalão de descarga, todos os casos em estudo revelam resultados constantes, excepto a estabilização com 0.5% de Xantano em que se obteve uma redução deste parâmetro comparativamente com as outras dosagens. Quanto ao escalão de carga, os resultados sugerem que dosagens mais altas (1.5% e 2%) induzem um decréscimo do coeficiente de consolidação, enquanto dosagens mais baixas originam valores mais elevados deste parâmetro. Estes resultados corroboram parcialmente com Kwon et al. (2019), no que diz respeito à diminuição do valor do parâmetro supracitado após o processo de estabilização com 0.5% de Xantano, para o caso do escalão de descarga.

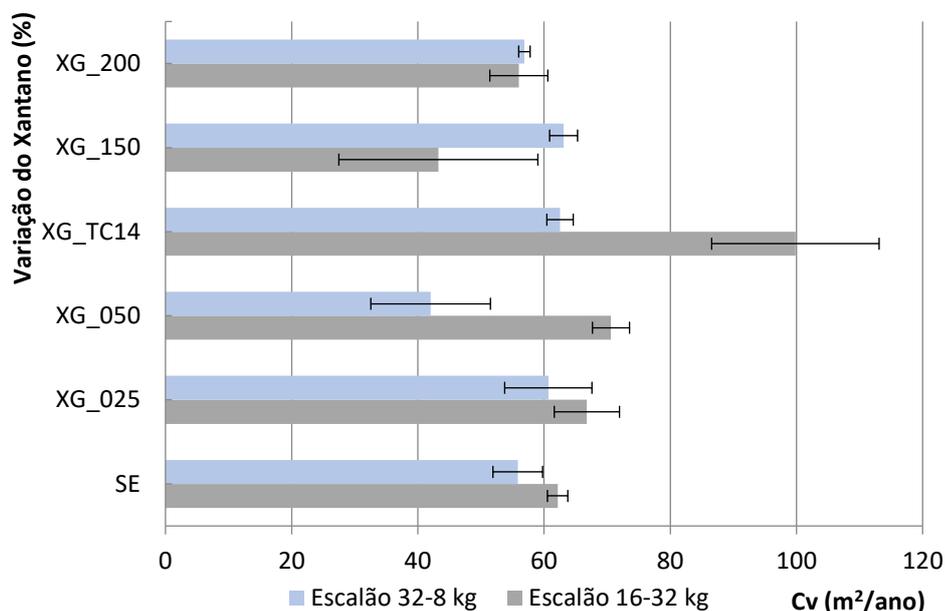


Figura 5.14 – Evolução do parâmetro C_v para dois escalões distintos com a variação da dosagem de Xantano.

5.2.5 Tabelas Resumo

O Quadro 5.3 apresenta os valores dos parâmetros associados à resistência e os valores do pH de todos os provetes realizados para as diferentes dosagens.

Quadro 5.3 – Valores de pH e dos parâmetros de resistência para as diferentes dosagens.

Nome	Nº do Provede ensaiado	Ensaio UCS				pH	pH médio
		q_u máx (KPa)	q_u médio (KPa)	E_{u50} (MPa)	E_{u50} médio (MPa)		
SE	Provede 1	113.79	125.80	6.19	8.35	7.88	7.91
	Provede 2	123.03		8.31		7.91	
	Provede 3	140.58		10.57		7.94	
XG_025	Provede 1	121.78	122.95	7.95	8.07	7.98	8.04
	Provede 2	119.58		8.05		8.04	
	Provede 3	127.49		8.20		8.09	
XG_050	Provede 1	116.87	120.48	5.12	6.11	8.03	8.01
	Provede 2	122.92		6.54		7.98	
	Provede 3	121.65		6.68		8.02	
XG_150	Provede 1	140.48	145.60	5.97	6.95	7.99	7.99
	Provede 2	141.47		6.36		7.97	
	Provede 3	154.86		8.53		8.00	
XG_200	Provede 1	165.86	161.29	7.84	7.00	7.94	7.95
	Provede 2	161.67		7.34		7.94	
	Provede 3	156.33		5.81		7.96	

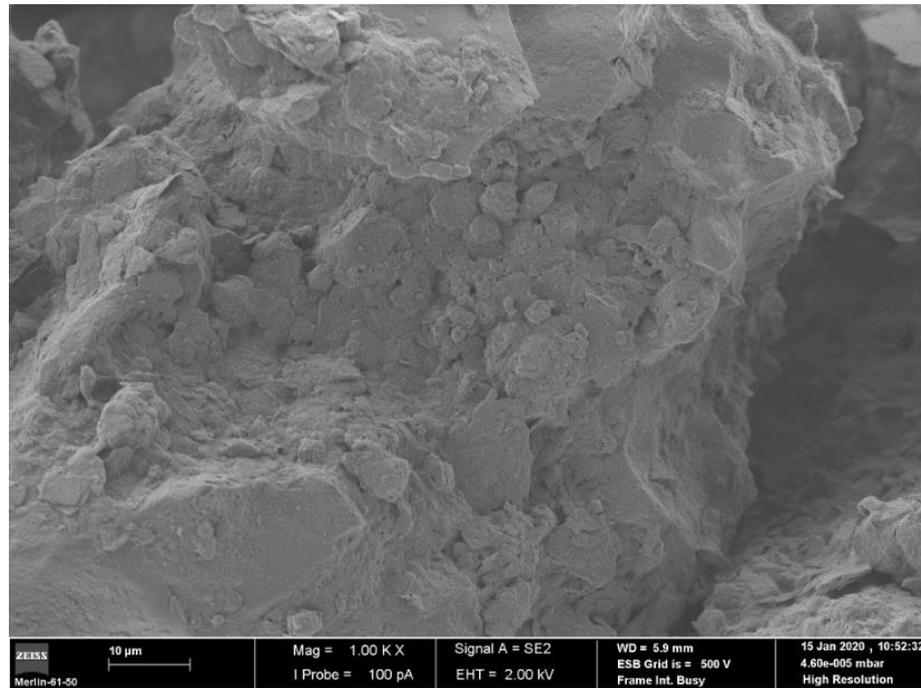
No Quadro 5.4 estão expostos os valores de todos os parâmetros extraídos através da realização dos ensaios edométricos para as diferentes dosagens aplicadas.

Quadro 5.4 – Valores dos parâmetros extraídos através de ensaios edométricos para diferentes dosagens.

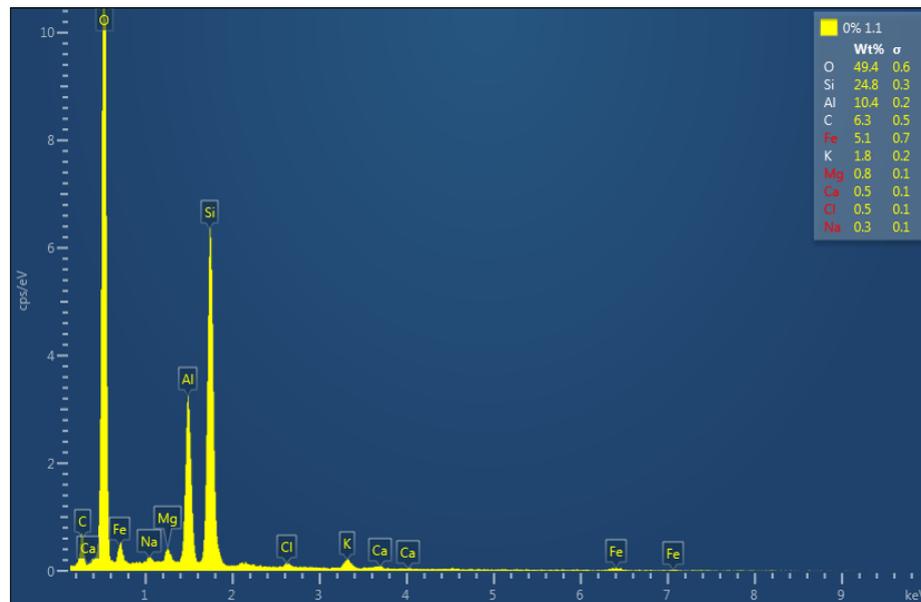
Nome	Nº do Provede ensaiado	Ensaio edométrico						
		Cc	Cc médio	Cr	Cr médio	Tensão de cedência (KPa)	Coeficiente de consolidação (Cv)	
							Carga (32Kg) (m ² /ano)	Descarga (8Kg) (m ² /ano)
SE	Provede 1	0.061	0.077	0.011	0.012	60	60.543	59.764
	Provede 2	0.093		0.012		54	63.763	51.900
XG_025	Provede 1	0.048	0.055	0.012	0.012	28	71.960	67.590
	Provede 2	0.062		0.011		34	61.622	53.761
XG_050	Provede 1	0.069	0.068	0.017	0.017	25	67.671	51.507
	Provede 2	0.066		0.016		23	73.547	32.549
XG_150	Provede 1	0.081	0.085	0.013	0.013	38	59.020	60.880
	Provede 2	0.088		0.012		35	27.482	65.318
XG_200	Provede 1	0.097	0.101	0.018	0.018	58	51.406	55.983
	Provede 2	0.104		0.018		50	60.602	57.800

5.3 Ensaio SEM

No sentido de identificar a presença do Xantano no solo bioestabilizado e comparar a estrutura do solo e os constituintes químicos entre amostras sem estabilização e com estabilização foi realizado o ensaio SEM. Para este efeito, foram submetidas amostras com 0, 1 e 2% de Xantano. De salientar que em todos os casos as imagens captadas foram igualmente ampliadas 1000 vezes, e que a análise química foi efectuada num ponto específico da amostra, sendo esta não representativa da generalidade do provede. Na Figura 5.15 está ilustrado o resultado do ensaio SEM da amostra sem estabilização, onde se constata através da análise química (Figura 5.15 b) que esta parte da amostra é composta maioritariamente por Oxigénio, Sílica e Alumínio.



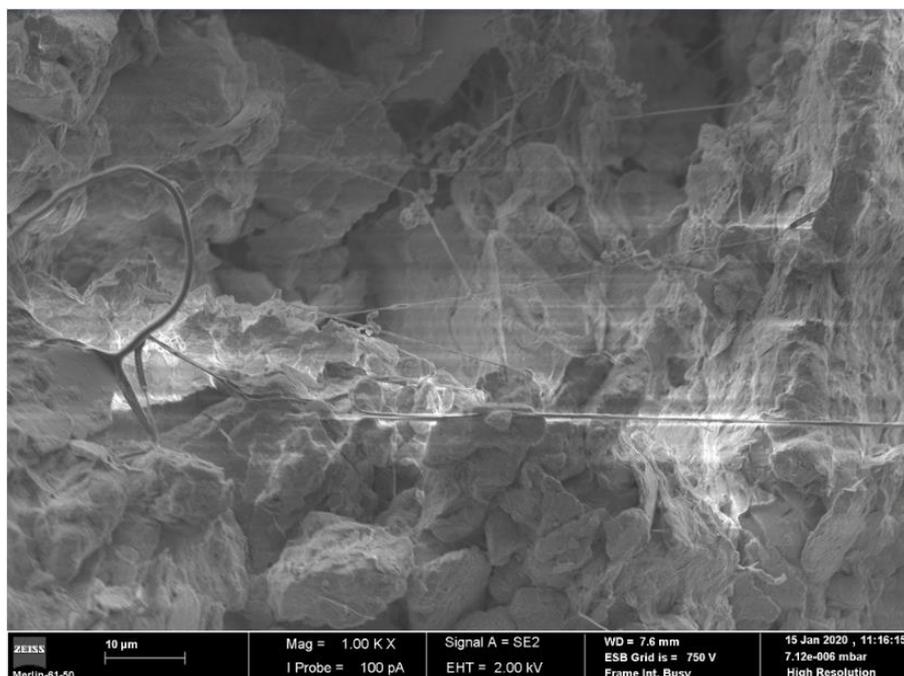
a)



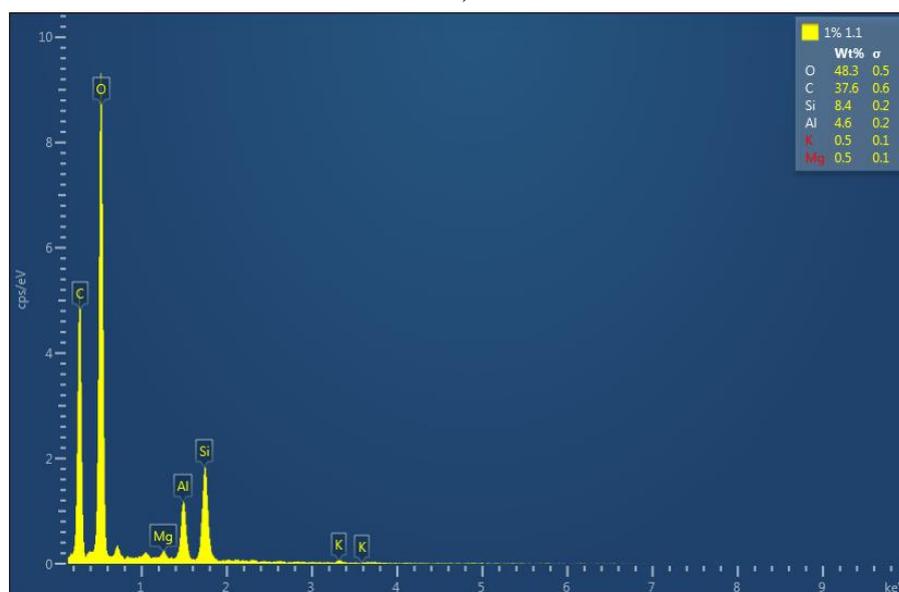
b)

Figura 5.15 – Ensaio SEM de uma amostra sem estabilização. a) Estrutura da amostra; b) Análise química da amostra.

Na Figura 5.16 encontram-se expostos os resultados relativos à amostra bioestabilizada com 1% de Xantano. Na Figura 5.16 a), é possível observar as ligações criadas entre o biopolímero e as partículas do solo. A Figura 5.17 b) mostra que o Carbono e o Oxigénio são os elementos químicos dominantes desta parte da amostra, indicando portanto uma subida da quantidade de Carbono em relação à amostra não estabilizada.



a)



b)

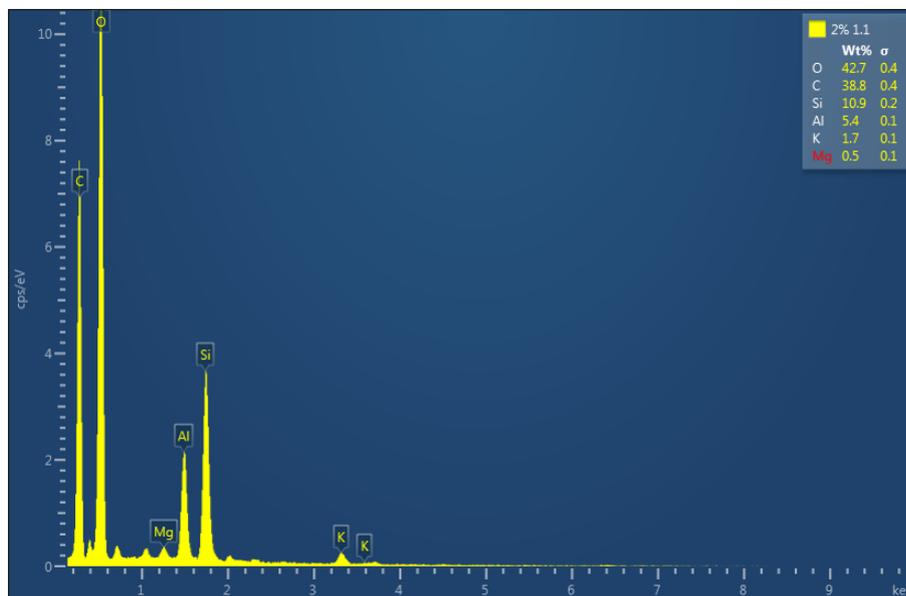
Figura 5.16 - Ensaio SEM da amostra bioestabilizada com uma dosagem de 1%. a) Estrutura da amostra; b) Análise química da amostra.

A Figura 5.17 mostra os resultados relativos à bioestabilização com a dosagem máxima (2%). Na Figura 5.17 a) é perceptível identificar um maior número de ligações entre o Xantano e as partículas do solo, comparativamente com os resultados do solo bioestabilizado com uma dosagem de 1%. O Carbono e o Oxigénio continuam a ser os principais elementos químicos detectados (Figura 5.17b), com um ligeiro aumento das suas percentagens relativas em

relação ao caso anterior devido ao facto de existir uma maior quantidade de Xantano, o qual contém os elementos supracitados na sua composição química (Figura 2.5).



a)



b)

Figura 5.17 - Ensaio SEM da amostra bioestabilizada com uma dosagem de 2%. a) Estrutura da amostra; b) Análise química da amostra.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

A presente dissertação tem como finalidade analisar o comportamento mecânico de um solo bioestabilizado com recurso a um biopolímero denominado Xantano. Este estudo incidiu sobre o efeito da variação do tempo de cura e a variação da dosagem do Xantano na evolução da resistência, compressibilidade, consolidação primária do solo e na identificação da presença do biopolímero supramencionado. As principais conclusões relativas ao efeito do tempo de cura em câmara húmida são as seguintes:

- i. O aumento do tempo de cura induz no solo um acréscimo da resistência à compressão e do módulo de deformabilidade, mais acentuado nos primeiros dias de cura.
- ii. O valor do pH do solo bioestabilizado aumenta com o aumento do tempo de cura.
- iii. O índice de compressibilidade parece aumentar ligeiramente com o aumento do tempo de cura, excepto dos 7 para os 14 dias de cura. Os resultados indicam que o índice de recompressibilidade é insensível à variação do tempo de cura.
- iv. A tensão de cedência permanece, praticamente constante ao longo do tempo de cura.
- v. Os resultados mostram que o coeficiente de consolidação para o patamar da carga (16 kg – 32 kg) parece ter uma evolução crescente com o aumento da cura, excepto dos 14 para os 28 dias. Os resultados indicam que o parâmetro supracitado é insensível à variação do tempo de cura para o patamar de descarga (32 kg – 8 kg).

O trabalho laboratorial permitiu ainda apresentar as seguintes conclusões relativas ao efeito da variação da dosagem do Xantano:

- i. A resistência à compressão não confinada é maior para as dosagens mais elevadas (1, 1.5 e 2%) face às dosagens mais baixas (0.25 e 0.5%) que registam valores ligeiramente inferiores ao solo não estabilizado. Os resultados indicam que o módulo de deformabilidade aparenta decrescer com o aumento da dosagem do agente estabilizador.
- ii. Os valores do pH não apresentam uma relação lógica com a variação da dosagem de Xantano.

- iii. O índice de compressibilidade apresenta, de uma maneira geral, uma evolução crescente com o aumento da dosagem do Xantano, excepto para uma dosagem de 0.25%. Os resultados sugerem que o índice de recompressibilidade permanece constante para as diferentes dosagens do agente bioestabilizador.
- iv. A tensão de cedência não apresenta uma relação lógica com a variação da dosagem do biopolímero.
- v. Os resultados indicam que o coeficiente de consolidação para o patamar de carga (16 kg – 32 kg) decresce quando se aumenta a dosagem do agente bioestabilizador. Para o escalão de descarga (32 kg – 8 kg) o parâmetro supramencionado mantém-se constante para todas as dosagens, excepto para 0.5% de Xantano.
- vi. O ensaio SEM permitiu identificar a presença de Xantano resultante do processo de bioestabilização. De realçar as diferenças a nível estrutural do solo bioestabilizado onde é possível observar as ligações criadas devido à presença do biopolímero e uma maior concentração de Carbono e Oxigénio em relação ao solo não estabilizado.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

De modo a complementar o estudo relativamente à temática deste trabalho, seria conveniente abordar os seguintes tópicos em trabalhos futuros:

- i. Aplicação do mesmo estudo a outro tipo de solos.
- ii. Comparação do método de mistura seco e húmido para vários tipos solos.
- iii. Comparação do uso de Xantano com outras técnicas bioestabilizadoras.
- iv. Aplicação do uso de Xantano a um caso real.
- v. Estudo de eventual impacte ambiental resultante do uso de Xantano.
- vi. Estudo do efeito do uso de Xantano na expansibilidade de uma argila.
- vii. Realização de ensaios triaxiais em solos estabilizados com Xantano.
- viii. Modelação numérica de um solo estabilizado devido à presença de Xantano vs Solo não estabilizado.
- ix. Comparação do mesmo estudo com outros biopolímeros, tais como: Gelano, β -Glucana, Ágar e Lignina.
- x. Efeito do tempo na biodegradabilidade do Xantano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- Ayeldeen, M., Negm, A., El-Sawwaf, M., & Kitazume, M. (2017). Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(2), 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.11.007>
- Borges, C. D., & Vendruscolo, C. T. (2008). Goma Xantana: características e condições operacionais de produção. *Semina: Ciências Biológicas e Da Saúde*, 29(2), 171. <https://doi.org/10.5433/1679-0367.2008v29n2p171>
- 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.
- Cardoso, A.S. (1987). “A técnica das pregagens em solos aplicada em escavações – métodos de análise e dimensionamento”. Tese de Doutoramento, FEUP, Porto.
- Cabalar, A. F., Wiszniewski, M., & Skutnik, Z. (2017). Effects of Xanthan Gum Biopolymer on the Permeability, Odometer, Unconfined Compressive and Triaxial Shear Behavior of a Sand. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 54(5), 356–361. <https://doi.org/10.1007/s11204-017-9481-1>
- Chang, I., Im, J., & Cho, G. C. (2016). Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering. *Sustainability (Switzerland)*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/su8030251>
- Chang, I., Im, J., Prasadhi, A. K., & Cho, G. C. (2015). Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening. *Construction and Building Materials*, 74(x), 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.026>
- 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.
- Correia, A. S. (2011). *Aplicabilidade da técnica de deep mixing aos solos moles do Baixo Mondego*. 502. Dissertação de Doutoramento, Dep. de Eng^a Civil da FCTUC, Coimbra.
- Dehghan, H., Tabarsa, A., Latifi, N., & Bagheri, Y. (2019). Use of xanthan and guar gums in soil strengthening. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(1), 155–165. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1625-0>
- DeJong, J. T., Fritzges, M. B., & Nüsslein, K. (2006). Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(5), 591–602. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132)
- DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., & Nelson, D. C. (2010). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36(2), 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.029>
- E 196 (1966). “Solos – Análise Granulométrica”. Especificações do LNEC, Lisboa, Portugal.
- E 197 (1966). “Solos – Ensaios de compactação”. Especificação do LNEC, Lisboa, Portugal.
- Fatehi, H., Abtahi, S. M., Hashemolhosseini, H., & Hejazi, S. M. (2018). A novel study on using protein based biopolymers in soil strengthening. *Construction and Building Materials*, 167, 813–821. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.028>
- Fernandes, M. de M. (2011). *Mecânica dos Solos. Conceitos e Princípios Fundamentais, Volume 1*. (FEUP Edições).
- García-Ochoa, F., Santos, V. E., Casas, J. A., & Gómez, E. (2000). Xanthan gum: Production, recovery, and properties. *Biotechnology Advances*, 18(7), 549–579. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(00\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(00)00050-1)
- Head, K.H. (1982). “Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests”. Pentech Press Limited. Plymouth, London
- Ivanov, V., & Chu, J. (2008). Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 7(2), 139–153. <https://doi.org/10.1007/s11157-007-9126-3>
- Jumikis, A. R. (1967). *Introduction to Soil Mechanics* (V. Nostrand & D. Company Inc. (eds.)).
- Kibert, C. J. (2013). *Sustainable Construction, Green Building Design and Delivery* (Third Edit).
- Kurnaz, T. F., Dagdeviren, U., Yildiz, M., & Ozkan, O. (2016). Prediction of compressibility parameters of the soils using artificial neural network. *SpringerPlus*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3494-5>
- Kwon, Y. M., Chang, I., Lee, M., & Cho, G. C. (2019). Geotechnical engineering behavior of biopolymer-treated soft marine soil. *Geomechanics and Engineering*, 17(5), 453–464. <https://doi.org/10.12989/gae.2019.17.5.453>
- Lambe, T.W.; Whitman, R.V. (1979). “Soil Mechanics, SI Version”. Jhon Wiley & Sons,

- New York.
- Latifi, N., Horpibulsuk, S., Meehan, C. L., Abd Majid, M. Z., Tahir, M. M., & Mohamad, E. T. (2017). Improvement of problematic soils with biopolymer-an environmentally friendly soil stabilizer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001706](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001706)
- Lee, S., Chung, M., Park, H. M., Song, K. Il, & Chang, I. (2019). Xanthan Gum Biopolymer as Soil-Stabilization Binder for Road Construction Using Local Soil in Sri Lanka. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(11). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002909](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002909)
- 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.
- 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.
- Nugent, R., Zhang, G., & Gambrell, R. (2010). Effect of exopolymers on the liquid limit of clays and its engineering implications. *Transportation Research Record*, 2101, 34–43. <https://doi.org/10.3141/2101-05>
- 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.
- Velde, K. Van De, & Kiekens, P. (2001). Ein Jahrhundert Bahnelektroindustrie. *Eb - Elektrische Bahnen*, 99(12), 483.
- UNESCO (2020). Disponível em <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/sciencetechnology/basic-sciences/life-sciences/biotechnology/>

ANEXO A

Quadro A.1 – Soluções numéricas da equação de consolidação de Terzaghi para diversas distribuições iniciais do excesso de pressão neutra.

T	Grau de consolidação médio, \bar{U}_z (%)				\bar{U}_z (%)	Factor tempo, T			
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4		Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
0,004	7,14	6,49	0,98	0,80	0	0	0	0	0
0,008	10,09	8,62	1,95	1,60	5	0,0020	0,0030	0,0208	0,0250
0,012	12,36	10,49	2,92	2,40	10	0,0078	0,0111	0,0427	0,0500
0,020	15,96	13,67	4,81	4,00	15	0,0177	0,0238	0,0659	0,0753
0,028	18,88	16,38	6,67	5,60	20	0,0314	0,0405	0,0904	0,101
0,036	21,40	18,76	8,50	7,20	25	0,0491	0,0608	0,117	0,128
0,048	24,72	21,96	11,17	9,60	30	0,0707	0,0847	0,145	0,157
0,060	27,64	24,81	13,76	11,99	35	0,0962	0,112	0,175	0,187
0,072	30,28	27,43	16,28	14,36	40	0,126	0,143	0,207	0,220
0,083	32,51	29,67	18,52	16,51	45	0,159	0,177	0,242	0,255
0,100	35,68	32,88	21,87	19,77	50	0,197	0,215	0,281	0,294
0,125	39,89	36,54	26,54	24,42	55	0,239	0,257	0,324	0,336
0,150	43,70	41,12	30,93	28,86	60	0,286	0,305	0,371	0,384
0,175	47,18	44,73	35,07	33,06	65	0,342	0,359	0,425	0,438
0,200	50,41	48,09	38,95	37,04	70	0,403	0,422	0,488	0,501
0,250	56,22	54,17	46,03	44,32	75	0,477	0,495	0,562	0,575
0,300	61,32	59,50	52,30	50,78	80	0,567	0,586	0,652	0,665
0,350	65,82	64,21	57,83	56,49	85	0,684	0,702	0,769	0,782
0,400	69,79	68,36	62,73	61,54	90	0,848	0,867	0,933	0,946
0,500	76,40	76,28	70,88	69,95	95	1,129	1,148	1,214	1,227
0,600	81,56	80,69	77,25	76,52	100	∞	∞	∞	∞
0,700	85,59	84,91	82,22	81,65					
0,800	88,74	88,21	86,11	85,66					
0,900	91,20	90,79	89,15	88,80					
1,00	93,13	92,80	91,52	91,25					
1,500	98,00	97,90	97,53	97,45					
2,000	99,42	99,39	99,28	99,26					

ANEXO B

Quadro B.1 – Valores dos teores de humidade de todos os provetes UCS ensaiados.

Nome do ensaio	Teor de humidade do ensaio ucs (%)		
	Provete 1	Provete 2	Provete 3
SE	10.52	10.40	10.27
XG_TC3	10.27	9.84	10.27
XG_TC7	9.28	8.60	9.13
XG_TC14	9.82	10.07	9.70
XG_TC28	9.83	9.40	9.35
XG_025	10.02	10.24	9.64
XG_050	10.63	10.61	10.00
XG_150	10.34	9.97	9.70
XG_200	10.16	9.96	9.01

Quadro B.2 – Valores dos teores de humidade relativos de todos os ensaios edométricos

Nome do ensaio	Teor de humidade dos ensaios edométricos (%)	
	Provete 1	Provete 2
SE	9.81	10.08
XG_TC3	10.45	9.76
XG_TC7	9.74	10.73
XG_TC14	11.53	10.49
XG_TC28	10.23	10.77
XG_025	10.03	11.38
XG_050	11.08	10.9
XG_150	10.48	10.9
XG_200	10.84	10.27