



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Maria José de Figueiredo de Cardoso da Cunha Reis

EFEITO DO TEOR EM MATÉRIA ORGÂNICA NO
COMPORTAMENTO DE SOLOS ESTABILIZADOS COM
O BIOPOLÍMERO XANTANO

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.

Outubro de 2021

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

Maria José de Figueiredo e Cardoso da Cunha Reis

Efeito do teor em matéria orgânica no comportamento de solos estabilizados com o biopolímero Xantano

**Effect of organic matter content on the behavior of soils stabilized with the
biopolymer Xanthan**

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.

Outubro de 2021



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Chega ao fim mais um capítulo da minha vida e com isso, quero agradecer às pessoas que me acompanharam desde o início e que acreditaram em mim.

Ao professor Doutor Paulo José da Venda Oliveira pela orientação e pelos conhecimentos transmitidos no decorrer da escrita.

Ao Sr. José António, técnico do laboratório de Geotecnia do DEC-FCTUC, pela sua disponibilidade durante o trabalho laboratorial.

Aos meus companheiros de laboratório, Lúcia e Rui, obrigada pela vossa ajuda.

Ao Vasco, à Paula, ao Rúben, à Teresa, à Carolina, à Sofia, ao Conceição e ao Luís, obrigada pelo vosso apoio incondicional e pela força que sempre me deram.

Por último, às pessoas mais importantes da minha vida, aos meus pais, irmão e avó, por toda a ajuda e compreensão constante. Obrigada pela oportunidade que me deram.

RESUMO

Na atualidade, a procura por alternativas sustentáveis na estabilização dos solos é constante no ramo da Engenharia Civil. O uso de bioestabilização é uma alternativa promissora em detrimento do cimento de modo a reduzir a pegada ecológica. Neste contexto, o presente trabalho pretende avaliar o efeito do teor de matéria orgânica na estabilização dos solos estabilizados com um biopolímero, Xantano.

Numa primeira fase, é feita a caracterização geotécnica do solo em estudo, passando pela sua composição granulométrica, limites de consistência, densidade das partículas sólidas, medição do pH e por último, teor em matéria orgânica.

Posteriormente, através da realização de ensaios UCS, determinou-se a resistência à compressão não confinada e módulo de deformabilidade. A partir dos ensaios edométricos, avaliou-se o índice de vazios das diferentes amostras não estabilizadas e bioestabilizadas, bem como o índice de compressibilidade, o índice de recompressibilidade e o coeficiente de consolidação. Complementarmente, foram obtidas Imagens SEM (Scanning Electron Microscope) das amostras de solo, com o propósito de analisar o efeito da bioestabilização na microestrutura do solo e identificar através de análise química a presença do Xantano.

Os resultados dos ensaios UCS permitem concluir que o processo de bioestabilização com Xantano tem um efeito benéfico nas propriedades mecânicas (resistência à compressão não confinada e deformabilidade) para teores em matéria orgânica até 5,5%, tendo um efeito negativo em solos mais orgânicos (OM=7,7%). Os ensaios edométricos permitem constatar que a estabilização com Xantano, devido ao aumento da capacidade de absorção de água pelos hidrogéis, induz o aumento de índice de vazios, de compressibilidade e de recompressibilidade e a diminuição do coeficiente consolidação. Os resultados também revelam que este efeito é potenciado com o aumento do teor em matéria orgânica.

Palavras-chave: Estabilização, Bioestabilização, Xantano, Matéria Orgânica, Ensaios UCS, Ensaios Edométricos.

ABSTRACT

Currently, the search for sustainable alternatives in soil stabilization is constant in the field of Civil Engineering. The use of biostabilization is a promising alternative to cement in order to reduce the ecological footprint. In this context, the present work intends to evaluate the effect of organic matter content in the stabilization of soils stabilized with a biopolymer, Xanthan.

In a first phase, the geotechnical characterization of the soil under study is carried out, passing through its granulometric composition, consistency limits, solid particle density, pH measurement and finally, organic matter content.

Subsequently, by performing UCS tests, the unconfined compressive strength and deformability modulus were determined. From the oedometric tests, the void index of the different non-stabilized and biostabilized samples was evaluated, as well as the compressibility index, the recompressibility index and the consolidation coefficient. In addition, SEM (Scanning Electron Microscope) images were obtained from the soil samples, with the purpose of analyzing the effect of biostabilization on the soil microstructure and identifying the presence of Xanthan through chemical analysis.

The results of the UCS tests allow to conclude that the biostabilization process with Xanthan has a beneficial effect on mechanical properties (unconfined compressive strength and deformability) for organic matter contents up to 5.5%, having a negative effect on more organic soils (OM=7.7%). Eodometer tests show that stabilization with Xanthan, due to the increased water absorption capacity of the hydrogels, induces an increase in the void index, compressibility and recompressibility, and a decrease in the consolidation coefficient. The results also show that this effect is enhanced with the increase in the material content.

Keywords: Stabilization, Biostabilization, Xanthan, Organic Matter, UCS tests, Oedometer tests.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas.....	x
SIMBOLOGIA	x
ABREVIATURAS	xii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento geral	1
1.2. Estrutura da dissertação	2
2. Revisão bibliográfica	3
2.1. Estabilização dos solos	3
2.2. Xantano como estabilizante	6
2.2.1. Permeabilidade	6
2.2.2. Resistência à compressão não confinada (q_u).....	8
2.2.3. Módulo de deformabilidade (E_{u50})	10
2.2.4. Compressibilidade e coeficiente de consolidação.....	11
2.2.5. Durabilidade e Estabilidade	12
2.2.6. Parâmetros de resistência ao corte (c' e Φ').....	12
2.2.7. Custos.....	13
2.3. Efeito do teor de matéria orgânica no comportamento de solos não estabilizados e estabilizados	14
3. Caracterização do solo	17
3.1. Introdução.....	17
3.2. Caracterização Geotécnica	17
3.2.1. Composição Granulométrica	17
3.2.2. Classificação unificada do solo	19
3.2.3. Limites de Consistência.....	20
3.2.4. Densidade das partículas sólidas	21
3.2.5. Medição do pH	21
3.2.6. Teor em Matéria Orgânica	22
4. Procedimento laboratorial.....	23
4.1. Preparação das amostras.....	23
4.2. Agente bioestabilizador	26
4.3. Preparação dos tubos PVC	26
4.3.1. Ensaio UCS e ensaios Edométricos.....	27
4.4. Ensaio de compressão simples não confinada (UCS).....	29
4.4.1. Equipamento.....	29

4.4.2. Descrição do ensaio	30
4.5. Ensaio Edométrico	33
4.5.1. Equipamento.....	33
4.5.2. Descrição do ensaio	34
4.6. Imagens SEM (Scanning Electron Microscope).....	38
4.7. Plano de ensaios.....	39
5. Análise de resultados	40
5.1. Ensaio UCS.....	40
5.1.1. Resistência à compressão (q_u) e módulo de deformabilidade (E_{u50}) .	41
5.2. Ensaio Edométrico	44
5.3. Imagens SEM	53
6. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	56
6.1. Conclusões.....	56
6.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Evolução ao longo do tempo dos ligantes utilizados na estabilização de solos. O uso de materiais e ligantes naturais começou AC e DC, com a Revolução Industrial surgiu o cimento Portland e a utilização do mesmo para compactação dos solos. Com o protocolo de Kyoto e com as preocupações de cariz ambiental, surgem os geopolímeros e biopolímeros como alternativas para engenharia geotécnica (Chang et al., 2016).....	3
Figura 2.2 - Evolução das emissões de CO ₂ a nível mundial entre 1980 e 2010. A curva a vermelho refere-se às emissões de CO ₂ associadas à produção do cimento e a curva preta refere-se as emissões globais de CO ₂ (Chang et al., 2016).....	4
Figura 2.3 - Efeito do tipo de biopolímero e sua concentração no coeficiente de permeabilidade (tcura = 5 semanas) a) Para uma amostra de areia; b) Para uma amostra siltosa (Ayeldeen et al. (2016)).....	7
Figura 2.4 - Imagens SEM de uma areia estabilizada com Xantano. a) 1 hora; b) 1 semana; c) 3 semanas. (Ayeldeen et al., 2016).....	7
Figura 2.5 - Imagem SEM. (Cabral, 2020).....	8
Figura 2.6 - Evolução da resistência à compressão simples com a dosagem de Xantano (tcura=5 semanas) (Aveldeen et al., (2016)).....	9
Figura 2.7- Evolução da resistência à compressão simples com a dosagem de Xantano. (Cabral, 2020).....	10
Figura 2.9 - Evolução da resistência à compressão simples e do módulo de deformabilidade com o tempo de cura. (Cabral, 2020).....	11
Figura 2.10 - Evolução da coesão com o tempo de cura. (Ayeldeen et al., 2016).....	12
Figura 2.11 - Evolução do preço do Xantano no mercado internacional. (baseado em Mendonça et al. 2021).....	13
Figura 2.12 - Comparação do preço de diversos biopolímeros em 2020. (Mendonça et al., 2021).....	14
Figura 2.13 - Variação do índice de vazios com a tensão, em escala logarítmica, para os diferentes teores em matéria orgânica. (Vieira et al. (2016)).....	15
Figura 2.14 - a) Variação do C _c , C _r e C _r /C _c para os diferentes teores em matéria orgânica b) Variação do índice de vazios (e ₀) com o C _v para os diferentes teores em matéria orgânica. (Vieira et al., 2016).....	15
Figura 2.15 - Variação do q _u do solo estabilizado e não estabilizado para as diferentes %OM (Neves et al., 2019).....	16
Figura 3.1 - Matéria retida nos seguintes peneiros.....	18

Figura 3.2 - Curva Granulométrica.	18
Figura 3.3 - Classificação granulométrica do solo segundo o triângulo de Feret.	19
Figura 3.4 - Determinação do w_l a partir da Concha de Casagrande.	20
Figura 3.5 - Teor de humidade para as várias pancadas.	21
Figura 4.1 - Solo natural fragmentado após secagem.	24
Figura 4.2 - Solo natural e solo queimado reduzido a pó.	24
Figura 4.3 - Material necessário para os tubos PVC 76/38.	27
Figura 4.4 - Tubos PVC 76/38 preparados.	27
Figura 4.5 - Carregamento das amostras para os ensaios edométricos.	28
Figura 4.6 - Segregação de água após carregamento.	28
Figura 4.7 - Amostras com 2,4% OM + Xantano preparadas para cura de 14 dias na câmara termo-higrométrica do laboratório.	29
Figura 4.8 - Equipamento utilizado para os ensaios UCS.	30
Figura 4.9 - Amostra com 5,5% OM + Xantano extraída do tubo PVC.	31
Figura 4.10 - Amostra com 5,5% OM + Xantano pronta para ser ensaiada.	31
Figura 4.11 - Correção “bedding-errors” - Amostra 5,5% OM + Xantano.	33
Figura 4.12 - Edómetro 2 e 3.	34
Figura 4.13 - Edómetro 4 e 7.	34
Figura 4.14 - Amostra 5,5% OM + Xantano após 14 dias de cura.	35
Figura 4.15 - Cravação do anel edométrico na amostra 5,5% OM + Xantano.	35
Figura 4.16 - Amostra com 7,7% OM + Xantano no início do ensaio.	36
Figura 4.17 - Amostra com 7,7% OM + Xantano no fim do ensaio.	36
Figura 4.18 - Aplicação do Método de Casagrande.	37
Figura 4.19 - Equipamento necessário - Imagens SEM.	38
Figura 4.20 - Amostras utilizadas para Imagens SEM, com e sem Xantano para os diferentes teores em matéria orgânica.	39
Figura 5.1 - Curva tensão-extensão axial para as diferentes percentagens de matéria orgânica em amostras não estabilizadas e estabilizadas com Xantano. a) OM = 1,5%; b) OM= 2,4%; c) OM= 4,1%; d) OM= 5,5%; e) OM= 7,7%.	43
Figura 5.2 - Resistência à compressão não confinada para as diferentes percentagens de matéria orgânica, e respetivos ganhos com a bioestabilização.	43
Figura 5.3 - Módulo de deformabilidade para as diferentes percentagens de matéria orgânica e respetivos ganhos com a bioestabilização.	44
Figura 5.4 - Curva e-log σ'_p obtidas nos ensaios edométricos para as diferentes percentagens de matéria orgânica em amostras não estabilizadas e estabilizadas	

com Xantano. a) OM = 1,5%; b) OM= 2,4%; c) OM= 4,1%; d) OM= 5,5%; e) OM= 7,7%.....	48
Figura 5.5 - Variação do índice de vazios para as diferentes percentagens de matéria orgânica em amostras não estabilizadas e estabilizados com Xantano. a) Índice de vazios inicial; b) Índice de vazios final.	49
Figura 5.6 - Variação do Cc para os diferentes para as diferentes percentagens de matéria orgânica, em provestes não estabilizados e estabilizados com Xantano.	50
Figura 5.7 - Variação do Cr para os diferentes para as diferentes percentagens de matéria orgânica, em provestes não estabilizados e estabilizados com Xantano.	51
Figura 5.8 - Variação do coeficiente de consolidação, Cv, para as diferentes percentagens de matéria orgânica em amostras não estabilizadas e bioestabilizadas. a) Escalão de carga (450-900 kPa); b) Escalão de descarga (900-225kPa).....	52
Figura 5.9 – Imagens SEM da estrutura do solo para as diferentes percentagens de matéria orgânica em amostras não estabilizadas e bioestabilizadas, ampliadas 2000X. a) OM=1,5% não estabilizada; b) OM=1,5% bioestabilizada; c) OM=4,1% não estabilizada; d) OM=4,1% bioestabilizada; e) OM=7,7% não estabilizada; f) OM=7,7% bioestabilizada.	54
Figura 5.10 - Imagens SEM da composição química do solo. a) OM=4,1% não estabilizada; b) OM=4,1% bioestabilizada.....	55

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Alguns efeitos dos biopolímeros utilizados na estabilização de solos baseado em Mendonça et al., (2021).....	5
Tabela 2.2- Valores de compressibilidade e coeficiente de consolidação para solo não estabilizado e solo estabilizado com 1% de Xantano (Kwon et al., 2019).....	11
Tabela 4.1 - Diferentes proporções em massa de solo queimado com solo natural.....	25
Tabela 4.2 - Limites de Consistência para os vários teores em matéria orgânica.	25
Tabela 4.3 - Quantidades de Xantano adicionado aos diferentes teores em matéria orgânica.	26
Tabela 4.4 - Plano de ensaios para o presente trabalho.....	39
Tabela 5.1 - Resumo dos valores obtidos nos ensaios UCS. a) Amostras não estabilizadas; b) Amostras bioestabilizadas.....	41
Tabela 5.2 - Resumo dos valores obtidos nos ensaios edométricos, C_r e C_c	45
Tabela 5.3 - Resumo dos valores obtidos nos ensaios edométricos, C_v , $e_{inicial}$ e e_{final} . a) Amostras não estabilizadas; b) Amostras bioestabilizadas.	46

SIMBOLOGIA

A – Área da secção transversal

A_c – Área da secção transversal corrigida

Au - Ouro

C_c - Índice de compressibilidade

CO_2 – Dióxido de carbono

C_r - Índice de recompressibilidade

C_v – Coeficiente de consolidação

D – Diâmetro do provete

d – Caminho máximo de drenagem

e - Índice de vazios

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

ϵ_a – Extensão axial

ϵ_{u50} – Extensão axial

F - Força

G - 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

IL - Índice de Liquidez

IP - Índice de plasticidade

OM - Teor em matéria orgânica

$P_{cáps}$ - Massa da cápsula usada no ensaio

$P_{s50^\circ C}$ - Massa da cápsula com o solo seco a 50°C

$P_{s400^\circ C}$ - Massa da cápsula com o solo seco a 400°C

t_{50} - Tempo correspondente a 50% da consolidação

T_v - Factor tempo

w - Teor em água

w_l - Limite de liquidez

w_p - Limite de plasticidade

γ_s – Peso volúmico saturado

γ_w – Peso volúmico da água

Δe - Variação do índice de vazios

σ'_v – Tensão efetiva vertical

ABREVIATURAS

ASTM – American Society for Testing and Materials

BS – British Standard

EN – Norma Europeia (European Standard)

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

IPN – Instituto Pedro Nunes

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NP – Norma Portuguesa

PVC – Policloreto de vinil

SEM – Scanning Electron Microscope

UCS – Unconfined Compression Strength

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento geral

Atualmente as estruturas de engenharia civil tendem a aplicar solicitações cada vez de maior magnitude, sendo muitas vezes fundadas em solos com fracas propriedades mecânicas. A construção nestas condições exige a melhoria das características mecânicas dos solos de fundação, recorrendo-se frequentemente a estacas de brita, estacas de betão, vibrocompactação, compactação dinâmica e estabilização de solos com cimento, entre outras. Contudo, a maioria destas técnicas requer um grande consumo de energia para operar a maquinaria e/ou para transformar as matérias-primas, como é o caso do cimento, cuja produção envolve emissões de CO₂ muito elevadas.

Nos últimos anos, a engenharia geotécnica tem vindo a investigar a utilização de algumas metodologias alternativas para reduzir a sua pegada ecológica, tais como: a reutilização de materiais, a utilização de geomateriais biodegradáveis e materiais de base biológica (substâncias derivadas de organismos vivos ou outrora vivos), entre outros.

Uma técnica bio alternativa consiste na utilização de biopolímeros, que são em geral polissacáridos biodegradáveis produzidos por organismos, como bactérias, algas, fungos, entre outros (Chang et al., 2015). O uso de biopolímeros na estabilização dos solos começa a ganhar destaque, dado o elevado número de trabalhos científicos publicados sobre esta temática. No presente trabalho aborda-se o uso do Xantano como estabilizante, estudando-se em complemento o efeito do teor em matéria orgânica na eficiência desta metodologia de bioestabilização.

1.2. Estrutura da dissertação

O presente estudo é constituído por seis capítulos, com as seguintes finalidades.

No Capítulo 1. Introdução – Enquadramento do tema, com especial destaque na preocupação que os estabilizantes acarretam para o meio ambiente e a utilização de outras alternativas para estabilização dos solos e consequentemente redução da pegada ecológica. Para além disso, é também apresentada a estrutura da dissertação.

Capítulo 2. Revisão Bibliográfica – Síntese dos principais resultados obtidos por outros autores relacionados com o tema em estudo, começando com o Xantano como estabilizante e as suas principais características, os custos associados e por último, o efeito do teor de matéria orgânica.

Capítulo 3. Caracterização do solo em análise – Estamos perante um solo mole e é neste capítulo que é feita a classificação do solo, composição granulométrica, limites de consistência, densidade das partículas sólidas, pH e teor em matéria orgânica.

Capítulo 4. Procedimento laboratorial – Neste capítulo é apresentado o material e equipamento utilizado, bem como a preparação das amostras, preparação dos tubos PVC, descrição dos ensaios realizados, realização de Imagens SEM e por último, plano de ensaios necessário à concretização deste trabalho.

Capítulo 5. Discussão e apresentação de resultados – Exposição dos resultados obtidos dos ensaios UCS, Edométricos e Imagens SEM e respetiva análise.

Capítulo 6. Conclusões e sugestões de trabalhos futuros – Para terminar e de forma sucinta enumeram-se as conclusões obtidas no capítulo 5 e com base no que foi realizado, são propostos trabalhos futuros relacionados com o tema.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Estabilização dos solos

Muitas formações geotécnicas apresentam, no seu estado natural, propriedades mecânicas do solo incompatíveis com a implantação de diversas construções de engenharia civil, caracterizadas por elevada deformabilidade ou deficiente resistência ao corte. Com o avanço da civilização e a crescente ocupação destas formações, a procura por soluções que viabilizem a construção nestas zonas é cada vez maior. Neste âmbito a estabilização de solos tem vindo a ter uma preponderância crescente a nível mundial.

A estabilização dos solos pode ser realizada por via físico-mecânica, química e biológica. A mais antiga e mais conhecida forma de estabilização é por via química, com a utilização de cal. Posteriormente, a utilização de compostos como o cimento, a cal e o betume foram também muito utilizados na estabilização de solos (Figura 2.1).

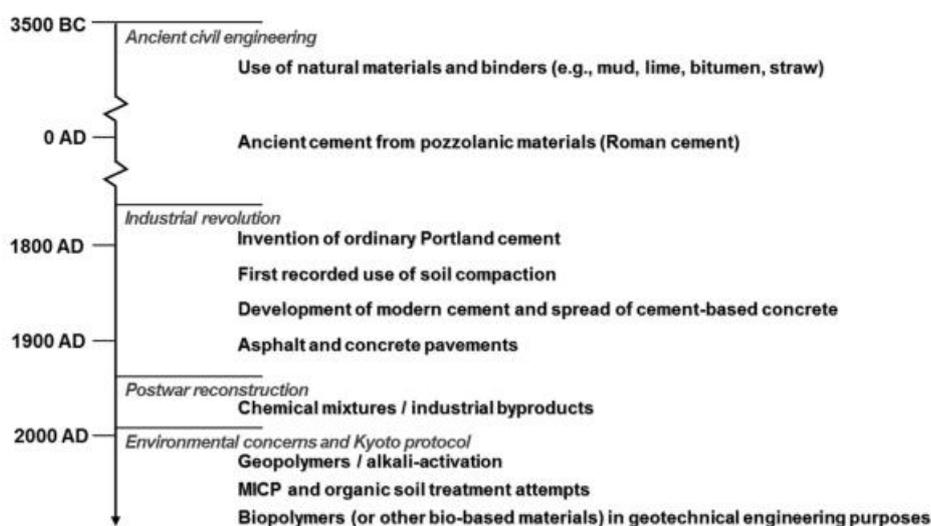


Figura 2.1 - Evolução ao longo do tempo dos ligantes utilizados na estabilização de solos. O uso de materiais e ligantes naturais começou AC e DC, com a Revolução Industrial surgiu o cimento Portland e a utilização do mesmo para compactação dos solos. Com o protocolo de Kyoto e com as preocupações de cariz ambiental, surgem os geopolímeros e biopolímeros como alternativas para engenharia geotécnica (Chang et al., 2016).

O cimento surge após a Revolução Industrial e começa logo a ter um grande destaque na área da construção e para materiais de construção, não apenas para propósitos estruturais, mas também para estabilização dos solos (Chang et al., 2016).

Hataf et al., (2017) refere que o método baseado na estabilização química é comumente usado e simples, mas pode muitas vezes, estar associado a riscos ambientais, tornando-os assim menos desejáveis. A utilização de material biológico tem vindo a ganhar destaque nos últimos anos, sendo promissor no melhoramento mecânico, representando um baixo impacto ambiental, além de permitir uma fácil biodegradação, o que pode ser uma desvantagem quando se pretende garantir a durabilidade da solução, mas uma vantagem em obras provisórias executadas em zonas sensíveis do ponto de vista ambiental.

Como referido anteriormente, o cimento é um dos mais utilizados e conhecido, mas representa ameaças para o meio ambiente. Apesar do cimento apresentar vantagens como o baixo custo, a durabilidade, a trabalhabilidade do material e uma elevada capacidade de estabilização, este está associado a uma pegada ecológica muito significativa.

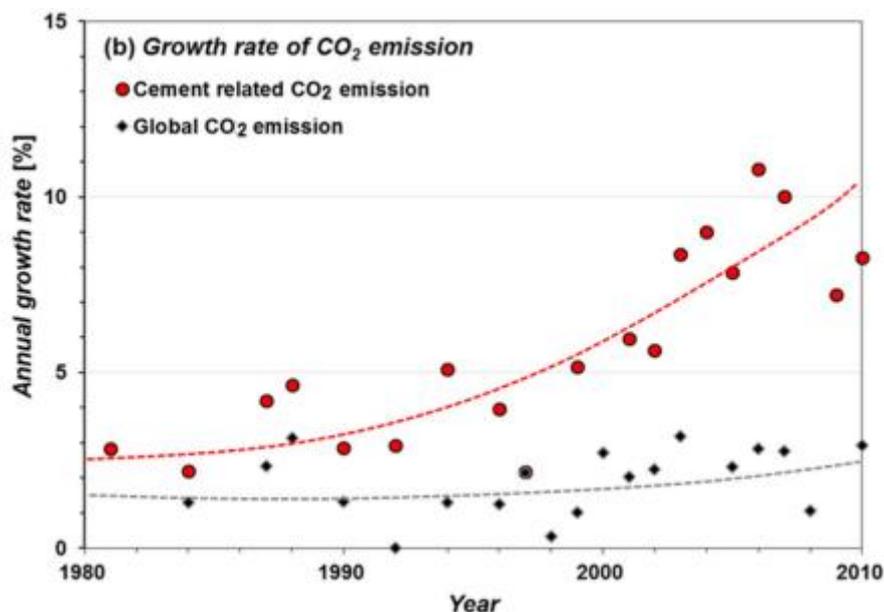


Figura 2.2 - Evolução das emissões de CO₂ a nível mundial entre 1980 e 2010. A curva a vermelho refere-se às emissões de CO₂ associadas à produção do cimento e a curva preta refere-se as emissões globais de CO₂ (Chang et al., 2016).

De facto, Chang et al. (2016) revelam que a taxa de crescimento anual de emissão de CO₂ relacionada com o cimento continua a aumentar anualmente (Figura 2.2), tendo alcançado cerca de 10% em 2010. Assim, a substituição do cimento por um componente mais amigo do ambiente é muito importante, surgindo neste contexto a utilização de biopolímeros como uma alternativa mais sustentável. Os biopolímeros são polímeros orgânicos sintetizados por organismos biológicos, existindo três tipos, os polinucleotídeos, os polipeptídeos e os polissacarídeos. Hataf et al. (2017) afirma que os biopolímeros são facilmente encontrados na Natureza e inofensivos.

Mendonça et al. (2021) explica que os biopolímeros podem ter vantagens em relação aos métodos tradicionais, como o cimento, porque apresentam características como boa viscosidade, resistência às forças de atrito e estabilidade para uma ampla gama de valores de pH e de temperatura. Na Tabela 2.1 são apresentados possíveis biopolímeros e respetivos efeitos na estabilização de solos.

Biopolímeros	Efeito
Xantano	-Diminuição da permeabilidade, -Retenção de água.
Caseína	-Estabilização de dunas
Beta-Glucano	-Aumenta a resistência à erosão dos solos e promove o crescimento da vegetação.
Gelano	-Melhora as propriedades mecânicas.
Quitosana	-Diminui a condutividade hidráulica.
Guar	-Aumenta as propriedades mecânicas, -Reduz a capacidade de potencial colapso dos solos plásticos.

Tabela 2.1 – Alguns efeitos dos biopolímeros utilizados na estabilização de solos baseado em Mendonça et al., (2021).

De acordo com Mendonça et al. (2021) o efeito dos biopolímeros no solo está relacionado à sua capacidade de formar uma matriz de gel estável sem prejudicar o ecossistema local. Além disso, o autor refere que até promove o crescimento vegetal.

2.2. Xantano como estabilizante

Mendonça et al., (2021) define o Xantano ($C_{35}H_{49}O_{29}$) como um polissacarídeo formado por fermentação aeróbica de açúcar das espécies bacterianas *Xanthomonas campestris* e comumente utilizado como aditivo na indústria alimentar. A cadeia principal é constituída por uma estrutura linear de β -D-glicose unidas por uma ligação 1-4 (Ayeldeen et al., 2016).

2.2.1. Permeabilidade

O Xantano tem uma grande capacidade de retenção de água devido à forte ligação de hidrogénio e isso comprovou-se no estudo de Chang et al. (2015) em que o tratamento do solo “Korean red-yellow” com este biopolímero melhorou o crescimento da vegetação, condição explicada pela sua forte capacidade para absorver água durante as estações chuvosas e também a alta retenção de humidade do solo durante a estação seca.

A permeabilidade depende também de dois grandes fatores, a quantidade de biopolímero e o tempo de cura. Os biopolímeros têm um grande efeito na redução da permeabilidade.

Ayeldeen et al. (2016), para o solo não tratado, obtiveram um coeficiente de permeabilidade de $3,4 \times 10^{-4}$ m/s para a areia e com $5,51 \times 10^{-6}$ m/s para a silte. A redução do coeficiente de permeabilidade para qualquer dos biopolímeros é notória, sendo este feito mais significativo com o aumento da concentração. Em relação ao Xantano constata-se, com um teor de 0,25% de concentração, a diminuição do coeficiente de permeabilidade para 60% do valor inicial e a redução alcança 4% para uma concentração de 2%.

Contudo, a permeabilidade do solo estabilizado com biopolímeros tende a aumentar para tempos de cura superiores. Neste mesmo estudo, a permeabilidade cresce de 150% para 220% nas primeiras 10 semanas, no caso da areia e cresce de 115% para 145% no caso da silte (Ayeldeen et al., 2016), o que está associado à expectável biodegradação do biopolímero. De acordo com estes autores, o menor aumento da permeabilidade em solos siltosos deve-se ao facto de as partículas finas impedirem o processo de desidratação, atrasando assim a sua evaporação.

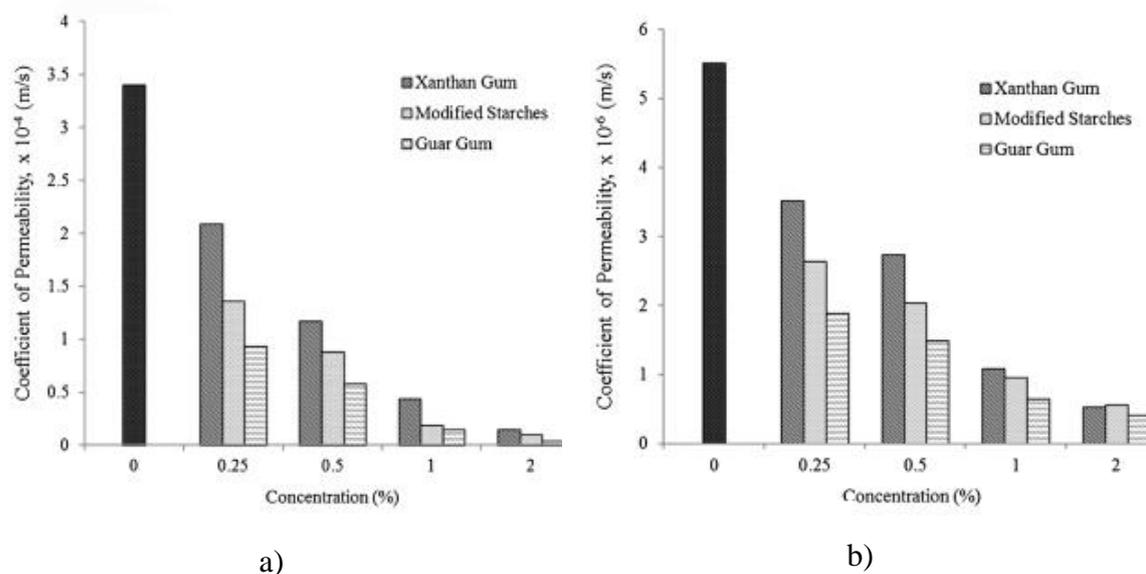


Figura 2.3 - Efeito do tipo de biopolímero e sua concentração no coeficiente de permeabilidade (tcura = 5 semanas) a) Para uma amostra de areia; b) Para uma amostra siltosa (Ayeldeen et al. (2016)).

Através de imagens SEM (Figura 2.4), consegue-se perceber que com o tempo as ligações ficam mais finas, aumentando o índice de vazios do solo, com consequências no aumento do coeficiente de permeabilidade (Ayeldeen et al., 2016).

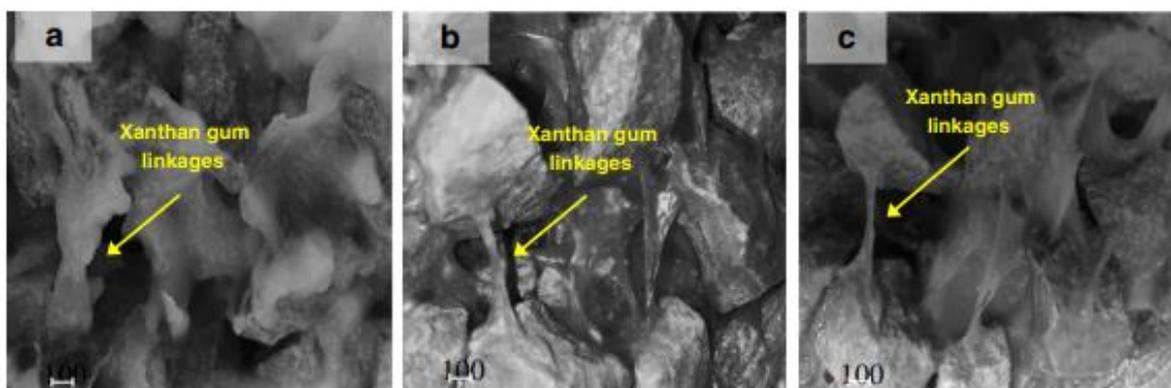


Figura 2.4 - Imagens SEM de uma areia estabilizada com Xantano. a) 1 hora; b) 1 semana; c) 3 semanas. (Ayeldeen et al., 2016)

Na Figura 2.5 mostra-se também a imagem SEM de uma areia siltosa estabilizada com 1% de Xantano, onde é possível ver bem as ligações do biopolímero com a amostra de solo em estudo (Cabral, 2020).



Figura 2.5 - Imagem SEM. (Cabral, 2020)

2.2.2. Resistência à compressão não confinada (q_u)

Mendonça et al. (2021) afirmam que as propriedades mecânicas melhoram com o tempo de cura e que a dosagem ótima de Xantano localiza-se entre 1-1,5%.

Chang et al. (2015) estudou o efeito de 1% de Xantano em quatro tipos de solo, uma areia, solo natural, solo residual designado por “Red Yellow soil” e uma argila, a partir de dois métodos de mistura diferentes. Num dos métodos o Xantano em pó é adicionado diretamente no solo, enquanto que no outro método o Xantano é misturado em água e posteriormente adicionado à solução de solo. A resistência à compressão foi estudada até aos 28 dias de cura. Concluiu-se que o método seco é mais eficiente, do qual resultam valores de resistência à compressão mais elevados em comparação com o método húmido.

Os resultados deste estudo mostram que no geral todos os solos beneficiaram com a bioestabilização através do uso de Xantano, mas que os solos argilosos apresentam efeitos mais vantajosos no que toca à resistência à compressão comparativamente com os solos arenosos (Chang et al., 2015). Com os resultados obtidos pelo autor, conclui-se que a interação do biopolímero em estudo com as partículas mais finas (argila) origina uma

resistência à compressão mais significativa do que a interação com partículas de maiores dimensões (grãos de areia). Assim, nesse estudo, os resultados que manifestaram as mais altas resistências foram em solos bem graduados, isto é, no solo natural e no solo “Red Yellow”, comparativamente aos outros dois solos em análise, mal graduados, solo argiloso e solo arenoso.

Aveldeen et al. (2016) comprovam que o aumento da dosagem de biopolímero aumenta de forma notável a resistência à compressão não confinada. Na Figura 2.6 observa-se o crescimento da resistência à compressão de 75kPa para 338 kPa para um aumento da concentração de Xantano de 0,25% para 2%.

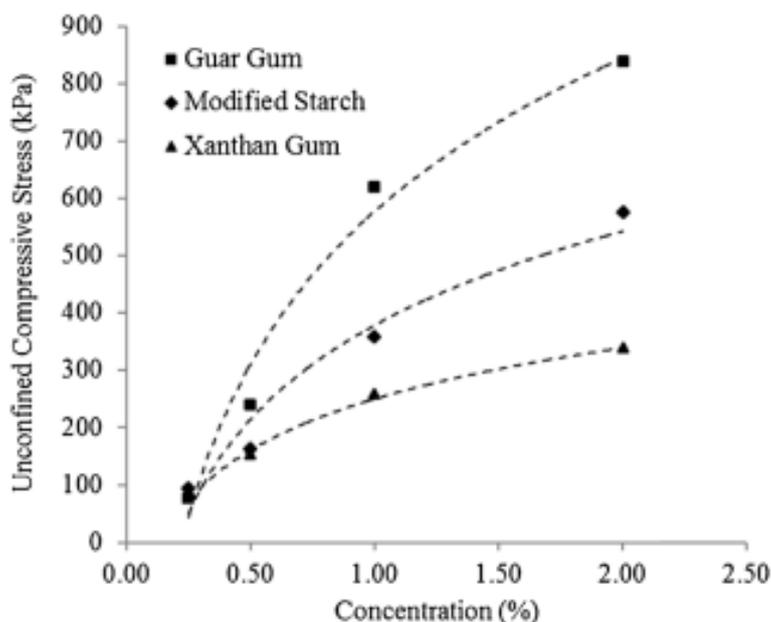


Figura 2.6 - Evolução da resistência à compressão simples com a dosagem de Xantano (tcura=5 semanas) (Aveldeen et al., (2016)).

Cabral (2020) conclui o mesmo, ou seja, o aumento da dosagem de Xantano levou a um ganho da resistência à compressão não confinada (Figura 2.7).

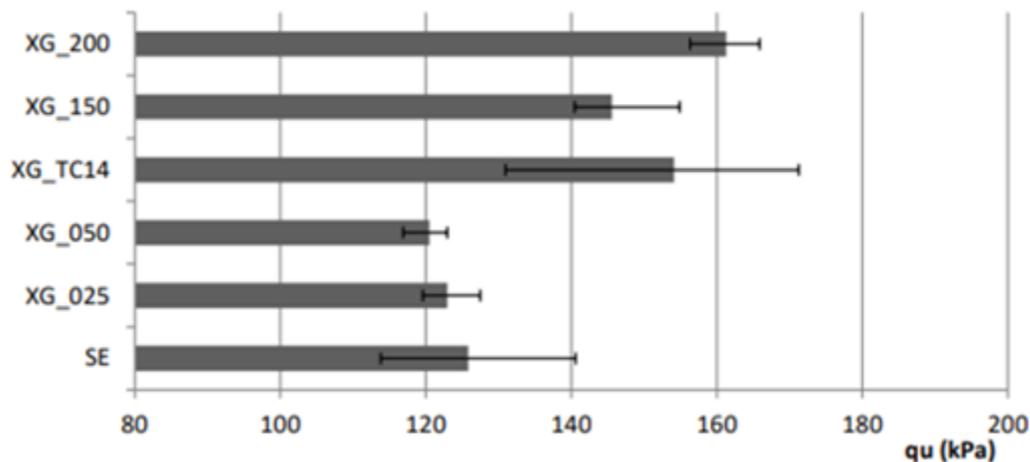


Figura 2.7- Evolução da resistência à compressão simples com a dosagem de Xantano. (Cabral, 2020)

2.2.3. Módulo de deformabilidade (E_{u50})

Lee et al. (2016) publicaram resultados de solo bioestabilização com Xantano onde para além de mostrarem vantagens em relação à resistência à compressão simples não confinada, o que vai de encontro ao que foi escrito no capítulo anterior, referenciam também o módulo de deformabilidade. O estudo destina-se à construção de uma estrada no Sri Lanka, tratando-se de uma areia siltosa. Foram introduzidas 3 dosagens diferentes (1%, 1,5% e 2%) do bioestabilizador e 2 tempos de cura (3 e 28 dias). Constatou-se que o módulo de deformabilidade diminui com o aumento da dosagem de Xantano e aumenta aproximadamente 10% de 3 dias de cura para 28 dias.

Em linha com outros trabalhos, Cabral (2020) conclui que o tempo de cura é decisivo para o aumento das propriedades mecânicas (resistência à compressão não confinada e módulo de deformabilidade), sendo que se verifica um aumento mais acentuado nos primeiros 14 dias e após esse tempo, até aos 28 dias, há uma atenuação da melhoria destas propriedades (Figura 2.8).

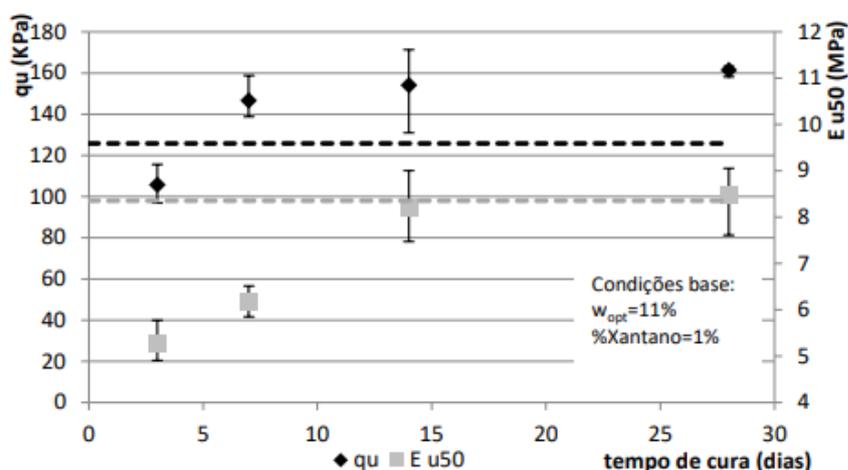


Figura 2.8 - Evolução da resistência à compressão simples e do módulo de deformabilidade com o tempo de cura. (Cabral, 2020)

2.2.4. Compressibilidade e coeficiente de consolidação

Kwon et al. (2019) realizaram ensaios edométricos de maneira a conseguir perceber qual seria a evolução dos parâmetros de compressibilidade e do coeficiente de consolidação de uma argila, estabilizada com 0,5% de Xantano e não estabilizada (Tabela 2.2). Estes autores concluíram que o processo de bioestabilização tende a diminuir de forma expressiva o coeficiente de consolidação (C_v) e a aumentar ligeiramente o coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v).

Soil	Load [kPa]	t_{50} [min]	t_{90} [min]	H_{dr} [mm]	m_v [Pa^{-1}]	k [$10^{-6} \text{cm}^2/\text{sec}$]			
						C_v [mm^2/min]	\sqrt{t}	$\text{Log } t$	\sqrt{t}
Untreated	10	27	106	30.35	0.38	6.61	7.39	2.94	3.29
	50	28	90.25	28.35	0.40	5.60	7.55	2.61	3.51
	100	33	110	27.36	0.42	4.41	5.78	2.12	2.78
	200	28	93	26.32	0.43	4.82	6.33	2.42	3.18
	400	20	84	25.06	0.46	6.05	6.35	3.22	3.37
Treated (0.5%)	10	667	3233	30.35	0.55	0.27	0.24	0.17	0.15
	50	700	3243	27.88	0.62	0.22	0.20	0.16	0.14
	100	370	1790	25.80	0.65	0.35	0.32	0.26	0.24
	200	280	1809	24.51	0.69	0.42	0.28	0.34	0.22
	400	350	1296	22.81	0.73	0.29	0.34	0.25	0.29

Tabela 2.2- Valores de compressibilidade e coeficiente de consolidação para solo não estabilizado e solo estabilizado com 1% de Xantano (Kwon et al., 2019).

2.2.5. Durabilidade e Estabilidade

Mendonça et al., (2021) afirma que todos os tipos de biopolímeros, até mesmo os que são à base de petróleo, são biodegradáveis na Natureza. Contudo, o Xantano é considerado um biopolímero estável, resistente a diferentes condições, como uma decomposição térmica abaixo de 250°C, oxidação, ambientes alcalinos e ácidos.

2.2.6. Parâmetros de resistência ao corte (c' e Φ')

A Figura 2.9 ilustra a variação da coesão com o tempo de cura de um solo estudado por Ayeldeen et al., (2016). De uma maneira geral, observa-se que a coesão aumenta com o aumento do tempo de cura, sendo que esse aumento também depende da dosagem do biopolímero. Provetes estabilizados com uma maior percentagem de biopolímero requerem mais tempo de cura (Ayeldeen et al., 2016).

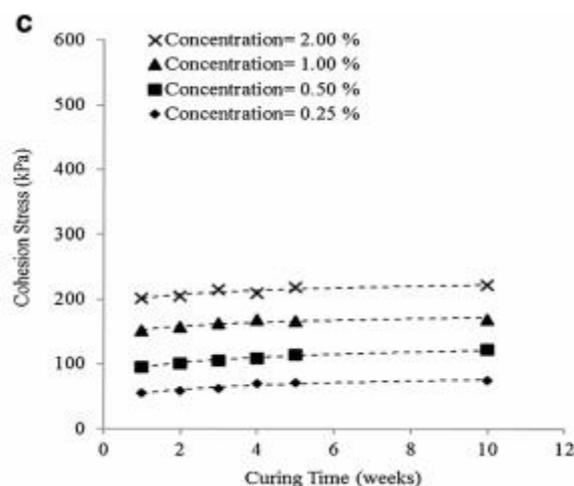


Figura 2.9 - Evolução da coesão com o tempo de cura. (Ayeldeen et al., 2016)

Mendonça et al., (2021) refere que mesmo uma pequena quantidade de Xantano adicionada à areia muda a resistência do solo. O aumento da quantidade de biopolímero faz aumentar a coesão, sendo que o ângulo de atrito permanece constante.

2.2.7. Custos

Espera-se que os biopolímeros sejam um substituto eficaz e promissor para substituir ou reduzir o uso de cimento, em solos para fins da engenharia geotécnica. No entanto, embora se espere que os biopolímeros sejam eficazes em menores concentrações em comparação com o cimento, o preço de mercado é mais alto do que o cimento (Chang et al., 2016). A Figura 2.10 mostra a evolução do preço do Xantano no mercado mundial, constatando-se uma redução significativa dos custos ao longo dos últimos 20 anos, o que está relacionado com o aumento do consumo deste produto associado à produção em massa. Nos últimos anos, observa-se a tendência para a estabilização do preço.

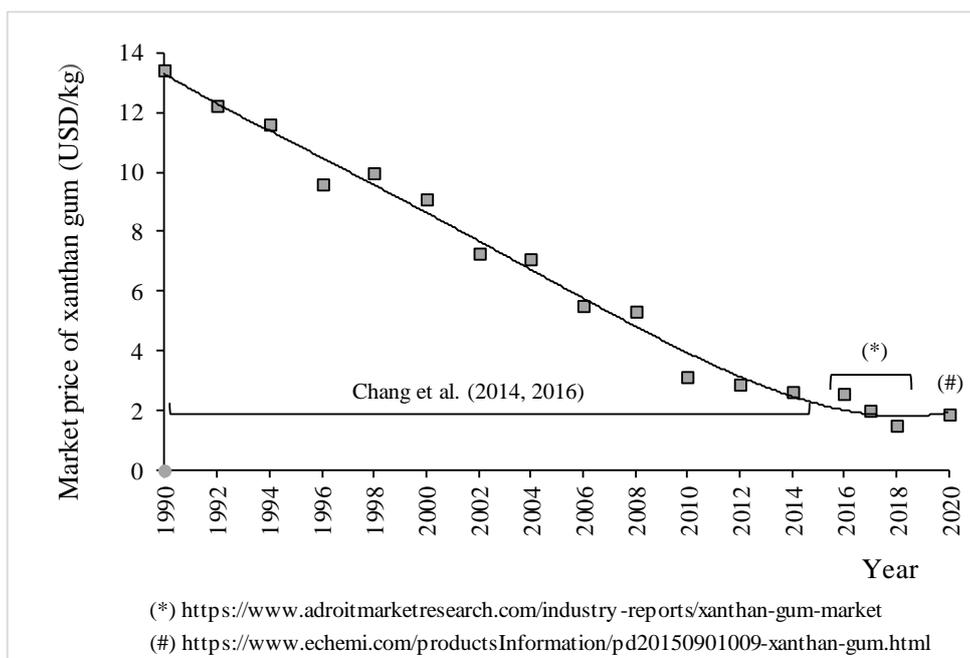


Figura 2.10 - Evolução do preço do Xantano no mercado internacional. (baseado em Mendonça et al. 2021)

Na Figura 2.11. confrontam-se os custos de alguns biopolímeros em 2020, constatando-se que o Xantano é um dos mais económicos, com um valor aproximado de 1500€/ton.

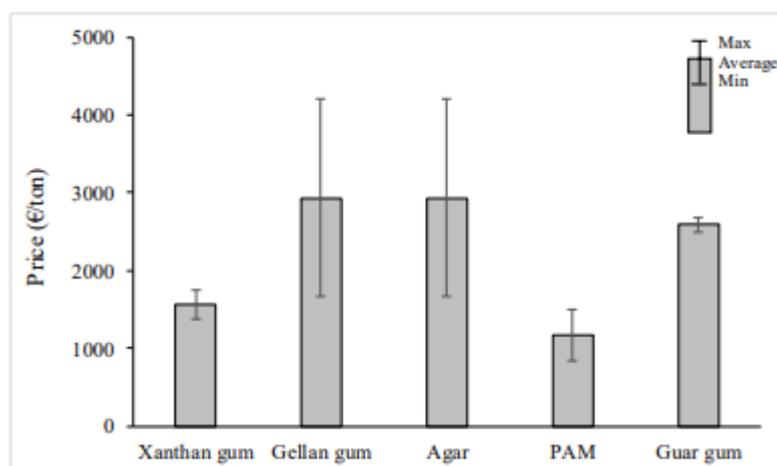


Figura 2.11 - Comparação do preço de diversos biopolímeros em 2020. (Mendonça et al., 2021)

O custo da utilização de uma dosagem de 0,5% de Xantano para tratamento do solo (ou seja, 5 kg de Xantano por 1 tonelada de solo) diminuiu cerca de 7 vezes durante as últimas três décadas. Tendo em consideração os fatores ambientais e admitindo que 0,5% de Xantano tem um efeito semelhante, em termos de estabilização, que a utilização de 10% de cimento, pode-se considerar que atualmente a utilização de Xantano é economicamente viável (Chang et al., 2016).

2.3. Efeito do teor de matéria orgânica no comportamento de solos não estabilizados e estabilizados

Vieira et al., (2016) estudou a influência do teor da matéria orgânica no comportamento do solo mole do Baixo Mondego. Neste estudo, as quatro amostras com diferentes teores em matéria orgânica (1,4%, 4,1%, 6,4% e 8,3%) foram submetidas a ensaios edométricos. Os resultados permitem concluir que o solo natural (OM=8,3%) é o que apresenta um maior índice de vazios e que à medida que o teor de matéria orgânica diminui, reduz-se também o índice de vazios.

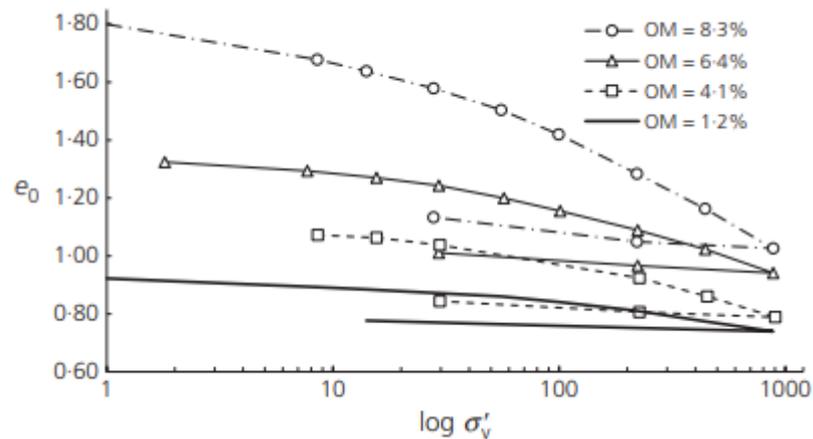


Figura 2.12 - Variação do índice de vazios com a tensão, em escala logarítmica, para os diferentes teores em matéria orgânica. (Vieira et al. (2016))

Vieira et al. (2016) afirma que os valores de C_c e C_r aumentam com o teor em matéria orgânica, sendo que para percentagens inferiores a 8,3% este acréscimo é menor.

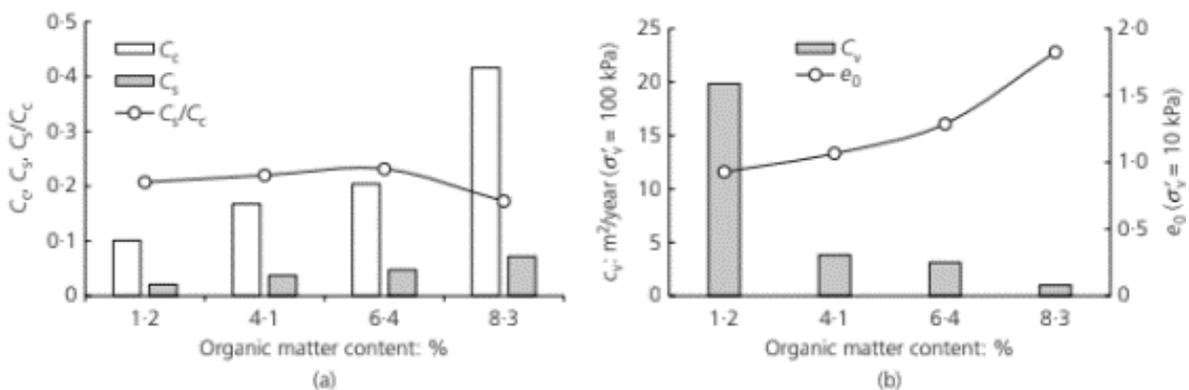


Figura 2.13 - a) Variação do C_c , C_r e C_r/C_c para os diferentes teores em matéria orgânica b) Variação do índice de vazios (e_0) com o C_v para os diferentes teores em matéria orgânica. (Vieira et al., 2016)

Neste estudo conclui-se que existe uma relação inversamente proporcional entre a percentagem de matéria orgânica e o valor de C_v , uma vez que este toma o valor máximo para o solo com menor quantidade de matéria orgânica, facto que se traduz no aumento da velocidade de consolidação.

Neves et al. (2019) estudou o efeito do teor de matéria orgânica na eficiência da biocimentação através da precipitação do Carbonato de Cálcio, induzido pela enzima *urease*. Foram feitas 6 misturas de solo com teores em matéria orgânica compreendidos entre 0% e

11,3%. Com base em resultados de ensaios UCS, estes autores concluíram que o processo de biocimentação induz um ganho da resistência à compressão não confinada entre 20% e 95%, para as misturas com OM=0% e OM=10,3%, respectivamente (Figura 2.14).

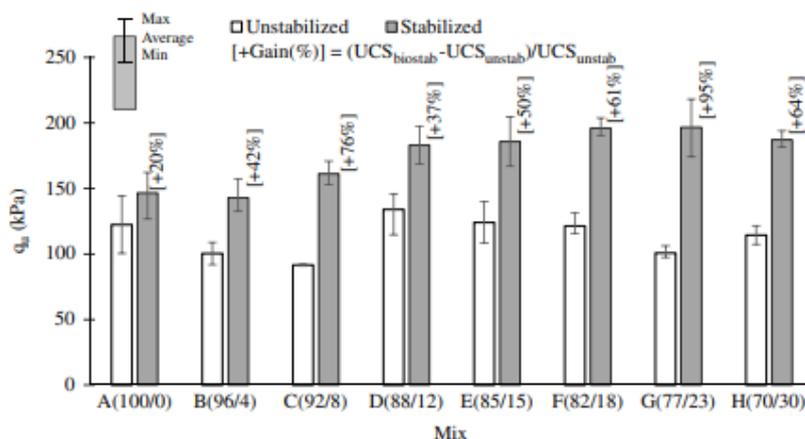


Figura 2.14 - Variação do q_u do solo estabilizado e não estabilizado para as diferentes %OM (Neves et al., 2019).

3. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

3.1. Introdução

O presente capítulo tem como finalidade a caracterização do solo mole recolhido no Baixo Mondego, mais precisamente na Quinta da Foja (Maiorca, Figueira da Foz). Para o efeito, a caracterização geotécnica passa por avaliar a composição granulométrica do solo, os limites de consistência, a densidade das partículas sólidas, o valor de pH e por último, o teor em matéria orgânica.

3.2. Caracterização Geotécnica

3.2.1. Composição Granulométrica

A composição granulométrica do solo consiste na distribuição em percentagem ponderal das partículas do solo de acordo com as suas dimensões.

A partir da norma E196-1966 LNEC, existem dois métodos para caracterização do solo, tendo como base a dimensão das partículas de solo. Para as partículas de maior dimensão (superior ou igual a 0,075mm), recorre-se à peneiração, que consiste na passagem de uma série de peneiros de malha quadrada cada vez mais apertada, obtendo-se assim a curva granulométrica a partir da percentagem de matéria retida no peneiro (Figura 3.1). Para partículas de menor dimensão (inferiores a 0,075mm) recorre-se à sedimentação, que consiste em misturar o solo com anti-floculante e água destilada e observar o processo de sedimentação das partículas que se encontram em suspensão, por intermédio da medição da densidade da suspensão em certos intervalos de tempo. Com base na lei de Stokes, é possível determinar a quantidade de partículas que no tempo t percorreram uma certa distância h .

Após a sua análise, conclui-se que existe uma maior quantidade de finos, 52% de silte e 22% de argila e de fração arenosa, 24% de areia. De modo a classificar o solo segundo a sua granulometria, a partir do Triângulo de Feret e de acordo com as percentagens obtidas, o solo é classificado como silte argiloso (Figura 3.3).

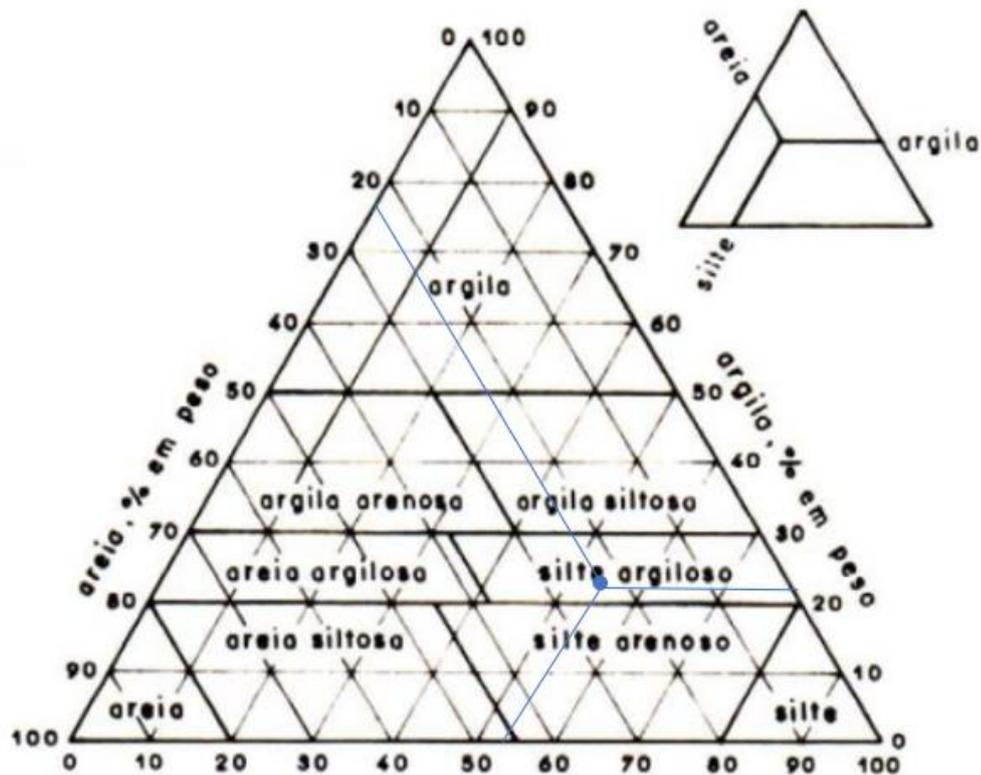


Figura 3.3 - Classificação granulométrica do solo segundo o triângulo de Feret.

3.2.2. Classificação unificada do solo

Nesta secção classifica-se o solo através da norma ASTM D 2487 (1998), onde se concluiu que o solo em estudo é classificado como um Silte Orgânico correspondendo ao símbolo OH, caracterizado por exibir um mau comportamento mecânico.

3.2.3. Limites de Consistência

Os limites de Consistência ou também conhecidos como limites de Atterberg, correspondem aos teores em água que limitam 4 zonas com diferentes comportamentos. O limite de retração, w_s , define a fronteira entre o comportamento de secagem a volume constante e o comportamento friável, o limite de plasticidade, w_p , fixa a fronteira entre o comportamento friável e o comportamento moldável, e por último, o limite de liquidez, w_l , estabelece a fronteira entre o comportamento moldável e o comportamento fluído.

Com base na norma NP 143 (1969) e a partir da Concha de Casagrande (Figura 3.4), o limite de liquidez, arredondado à unidade, é de 71%.



Figura 3.4 - Determinação do w_l a partir da Concha de Casagrande.

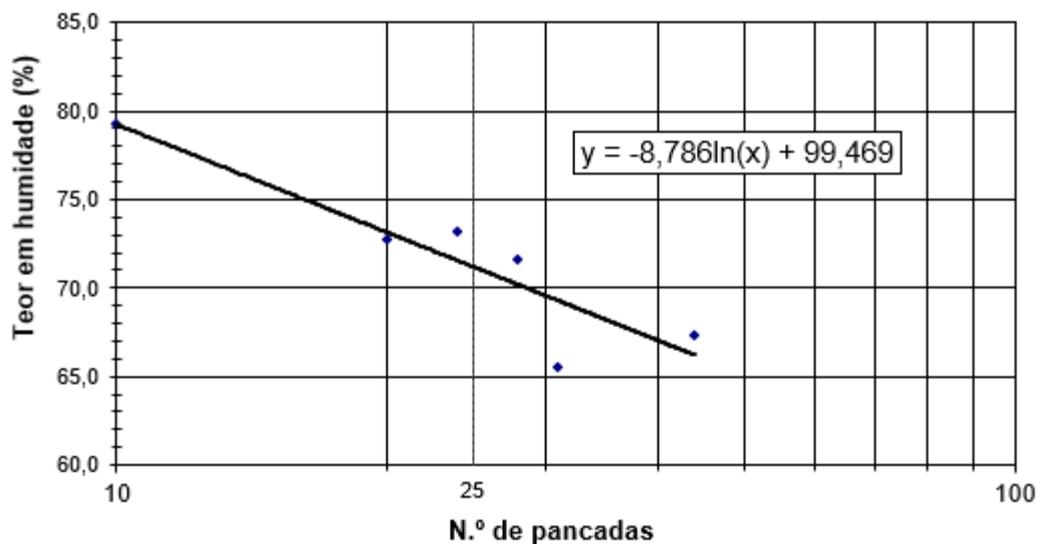


Figura 3.5 - Teor de humidade para as várias pancadas.

No caso do limite de plasticidade obteve-se um valor de 44,26%, através da rolagem do solo com a placa de vidro. O índice de plasticidade é a diferença entre estes dois últimos valores, que para o solo em causa assume um valor de 26,74%.

Os resultados aproximam-se dos obtidos por Correia (2011), que obteve para o limite de plasticidade (w_p) 42,80% e para o limite de liquidez (w_l) 71,03%.

3.2.4. Densidade das partículas sólidas

A densidade das partículas sólidas G , é resultado do quociente entre o peso volúmico das partículas sólidas, γ_s , e o peso volúmico da água, γ_w , destilada a 20°C. Com base na norma NP 83 (1965), obteve-se o valor médio de $G=2,32$, com base no resultado das três amostras. Este valor não é muito diferente do obtido por Correia (2011) de $G=2,55$.

3.2.5. Medição do pH

Tendo como base a norma BS 1377-3 de 1990 de British Standard, foram obtidos os seguintes valores médios de 3,47 para uma amostra de solo seca em estufa e de 3,64 para uma amostra de solo no seu estado natural.

3.2.6. Teor em Matéria Orgânica

A matéria orgânica tem uma grande influência no comportamento físico dos solos e assim sendo, determinou-se a quantidade de matéria orgânica presente no solo em estudo através da técnica das perdas por ignição no qual se submete a amostra de solo previamente pesada, a uma secagem de 24 horas à temperatura de 50°C. Após pesagem, voltou-se a secar a amostra a uma temperatura de 400°C.

A partir da Eq. 3.1, descrita na norma BS 1377:3 (1990), o teor de matéria orgânica do solo em estudo foi de 7,74%, sendo um valor próximo do obtido por Vieira (2016) de 8,3%, por Correia (2011) de 7,96% e por Coelho (2000) de 8,50%.

$$OM = \frac{P_s^{50^\circ C} - P_s^{400^\circ C}}{P_s^{50^\circ C} - P_{cápsula}} \quad (3.1)$$

Em que $P_s^{50^\circ C}$ e $P_s^{400^\circ C}$ dizem respeito à massa do solo mais a cápsula após secagem a 50°C e 400 °C respetivamente, e por último, $P_{cápsula}$ é a massa da cápsula usada no ensaio.

4. PROCEDIMENTO LABORATORIAL

As amostras a ensaiar em laboratório podem ser classificadas como indeformadas ou reconstituídas. As amostras intactas são recolhidas com o auxílio de amostradores, *in situ*, tentando-se preservar ao máximo a estrutura dos solos no seu estado natural. Coelho (2000) refere que a estrutura dos solos da Quinta da Forja é difícil de manter, devido à sua grande deformabilidade, mesmo com amostradores de alta qualidade. No presente trabalho, foram utilizadas amostras reconstituídas, as quais mantêm a composição mineralógica, orgânica e granulométrica do solo original, e tentam mitigar a heterogeneidade presente no solo *in-situ*, permitindo uma melhor interpretação dos resultados.

Este capítulo serve para descrever o processo de reconstituição das amostras a utilizar nos ensaios UCS e edométricos.

4.1. Preparação das amostras

Usaram-se cerca de 30kg de solo natural que foi armazenado na câmara termo-higrométrica do laboratório, no interior de caixa de plástico isolado com filme de plástico para combater as possíveis perdas de água. É de referir que à medida que se retirava solo da caixa, era feita uma mistura prévia e o controlo do teor em água.

No presente estudo pretende-se determinar o efeito do teor da matéria orgânica no comportamento de solos estabilizados com Xantano. Por esse motivo é de real interesse explicar o modo como foram obtidas as diferentes percentagens de matéria orgânica (0%, 2,4%, 4,1%, 5,5% e 7,7% (solo natural)).

Cerca de 15kg de solo foi previamente seco à temperatura de 400°C (queima com duração de 63h) e posteriormente reduzido a pó (Figura 4.1). Numa primeira fase de forma grosseira, com o auxílio de um martelo, um pilão e um almofariz, e posteriormente colocado no

Moinho de Bolas. Este solo “queimado” foi o referencial, possuindo um teor em matéria orgânica de aproximadamente 1,5%.

Os restantes 15kg de solo foram secos à temperatura de 400°C (queima com duração de 24h) e posteriormente reduzido a pó, da mesma forma como foi descrito no parágrafo a cima.



Figura 4.1 - Solo natural fragmentado após secagem.

Os vários teores em matéria orgânica a utilizar no presente trabalho, foram obtidos através da mistura do “solo queimado” com o solo natural.



Figura 4.2 - Solo natural e solo queimado reduzido a pó.

Com base nas percentagens de matéria orgânica obtidas por Vieira (2016), foi possível definir as proporções em massa de solo queimado com solo natural. De seguida, são

apresentadas na tabela 4.1. as diferentes dosagens de solo para as várias percentagens de matéria orgânica.

OM (%)	$\frac{Solo_{queimado}}{Solo_{natural}}$
2,40%	78/20
4,10%	64/40
5,50%	30/63

Tabela 4.1 - Diferentes proporções em massa de solo queimado com solo natural.

Para as diferentes misturas, cada uma correspondendo a um dado teor em matéria orgânica, determinaram-se os limites de liquidez (w_l) e de plasticidade (w_p), de forma a dosear a quantidade de água adicionada, para que todas as amostras fossem ensaiadas para o índice de liquidez (IL) igual a 1,09.

$$w = IP \times IL + w_p \quad (4.1)$$

Os valores referentes a cada amostra são apresentados na Tabela 4.2.

	1,50%OM	2,40%OM	4,10%OM	5,50%OM	7,70%OM
L.L.(%)	36,30	40,93	43,61	44,14	71,00
L.P. (%)	15,26	33,08	33,18	33,01	44,26
I.P. (%)	21,04	7,85	10,43	11,14	26,74
w (%)	38,19	41,64	44,55	45,15	73,41

Tabela 4.2 - Limites de Consistência para os vários teores em matéria orgânica.

Antes de qualquer dos ensaios, foi medido o teor em água das respectivas amostras para verificar o valor de IL.

4.2. Agente bioestabilizador

O método de mistura do agente bioestabilizador foi o método seco, em consonância com os resultados Chang et al. (2015), que consideram que este método é aquele que proporciona melhores resultados.

Para a preparação dos provetes utilizados nos ensaios UCS e edométrico preparam-se 1390g (500g UCS + 890g edométrico) de solo para ser misturado com 1% de Xantano, referente à massa seca de solo. Na tabela 4.2 apresentam-se as quantidades de Xantano adicionadas a cada percentagem de matéria orgânica para o total de 1390g de solo.

	1,5%OM	2,4%OM	4,1%OM	5,5%OM	7,7%OM
1% de Xantano	10,06g	9,18g	9,62g	9,58g	8,22g

Tabela 4.3 - Quantidades de Xantano adicionado aos diferentes teores em matéria orgânica.

4.3. Preparação dos tubos PVC

De acordo com a norma ASTM D 2166 (2000), os provetes a utilizar nos ensaios UCS foram preparados com uma relação de 2 entre a altura (h) e o diâmetro (D), por forma a evitar problemas de encurvadura, tendo-se recorrido a tubos de PVC com relação de 76/38 (h/D) (Figura 4.3). Os provetes para os ensaios edométricos foram preparados com recurso a tubos de PVC com relação de 140/70 (h/D), dos quais era possível obter dois provetes edométricos. É de referir que para os ensaios UCS foram preparados 3 tubos para cada percentagem de matéria orgânica com e sem Xantano, perfazendo um total de 30 tubos. Para os ensaios edométricos foram preparados 2 tubos para cada percentagem de matéria orgânica com e sem Xantano, perfazendo um total de 20 tubos.

De seguida, será descrito a forma como foram preparados os provetes para os dois tipos de ensaios realizados.

4.3.1. Ensaio UCS e ensaio Edométricos

- Em primeiro lugar, colocou-se vaselina no interior do tubo PVC (tanto para o tubo 76/38 como para o tubo 140/70), de maneira a reduzir o atrito lateral entre as paredes do tubo e do solo, facilitando assim a sua posterior extração.
- Para os dois tamanhos de tubos PVC, a base foi selada com fita adesiva, a qual, com o auxílio de um prego, foi perfurada (Figura 4.3).
- De seguida, colocou-se papel de filtro, previamente molhado, na base do tubo PVC 76/38 com a ajuda de uma vara de madeira. Para o tubo PVC 140/70 colocou-se papel de filtro seco na base, com o auxílio de uma vara de madeira.



Figura 4.3 – Material necessário para os tubos PVC 76/38.



Figura 4.4 - Tubos PVC 76/38 preparados.

- Encheu-se o tubo com o tipo de solo pretendido. Para o tubo PVC 76/38 o enchimento foi feito por 3 camadas com 10 pancadas entre elas, por forma a eliminar possíveis vazios. Para o tubo PVC 140/70 o enchimento foi feito também por 3 camadas tendo especial atenção em remover as bolhas de ar que possam ficar no seu interior com o auxílio de uma vareta. Entre camadas deram-se 10 pancadas de maneira a eliminar o ar presente nos vazios do solo. Para

as amostras com Xantano, o enchimento do tubo foi feito por 2 camadas para que após os 14 dias, ao ser cravado o anel edométrico por duas vezes, a união entre camadas fosse a melhor possível. Com a haste de madeira tentou-se uniformizar o mais possível a amostra de solo. - Por fim, na última camada do tubo PVC 76/38 colocou-se geotêxtil e carregou-se o provete com um peso de 9,860kg durante 30 segundos. Para o tubo PVC 140/70 colocou-se o geotêxtil humedecido no topo da amostra e esta foi carregada com 2 pesos de 9,66kg/cada durante 30 minutos (Figura 4.5).



Figura 4.5 - Carregamento das amostras para os ensaios edométricos.



Figura 4.6 - Segregação de água após carregamento.

Os tubos sem Xantano foram ensaiados de seguida e os tubos com Xantano foram colocados num saco de plástico, devidamente fechado, para cura de 14 dias na câmara termo-higrométrica do laboratório à temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $95\pm 5\%$. Como esperado, é de notar que após o carregamento, há a saída de alguma água, como se observa na Figura 4.6.

Os tubos sem Xantano foram ensaiados de seguida e os tubos com Xantano foram colocados num saco de plástico e deixados na câmara termo-higrométrica do laboratório para cura durante 14 dias (Figura 4.7).



Figura 4.7 - Amostras com 2,4%OM + Xantano preparadas para cura de 14 dias na câmara termo-higrométrica do laboratório.

4.4. Ensaio de compressão simples não confinada (UCS)

Os 30 tubos (15 com Xantano para os vários teores em matéria orgânica + 15 sem Xantano para os vários de matéria orgânica) foram ensaiados de acordo com a Norma BS 1377-7 (1990), permitindo obter a resistência à compressão simples não confinada (q_u) e o módulo de deformabilidade secante para 50% da tensão da rotura (E_{u50}).

4.4.1. Equipamento

O equipamento utilizado para este ensaio foi a prensa ELDYN (GDS Entry Level Dynamic Triaxial Testing System) que se encontra ilustrada na Figura 4.8.



Figura 4.8 - Equipamento utilizado para os ensaios UCS.

4.4.2. Descrição do ensaio

Os ensaios UCS foram realizados para uma velocidade de corte de 1%/min em relação à altura do provete, isto é, 0,76mm/min. A Norma ASTM D 2166 (2000) recomenda que a velocidade seja entre 0,5% e 2%/min em relação à altura da amostra, cumprindo com o intervalo recomendado.

Após o tempo de cura estabelecido para as amostras estabilizados com o biopolímero, o provete é retirado da câmara húmida e de seguida remove-se a fita-cola e papel de filtro da base. Com a ajuda de um extrator hidráulico, remove-se a amostra do tubo PVC (Figura 4.9).

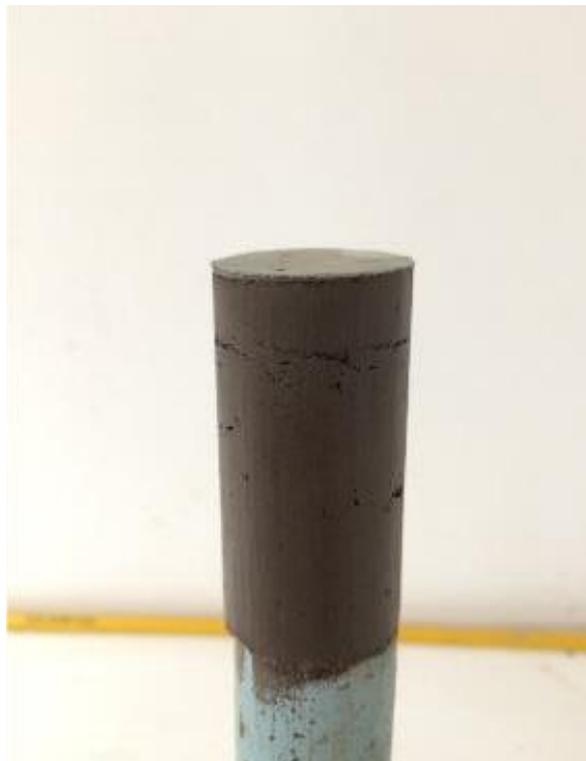


Figura 4.9 - Amostra com 5,5%OM + Xantano extraída do tubo PVC.



Figura 4.10 - Amostra com 5,5%OM + Xantano pronta para ser ensaiada.

De seguida, coloca-se a amostra na prensa do ensaio, centrando-a em relação à célula de carga, de forma a que a carga seja aplicada uniformemente no seu centro (Figura 4.10). A placa de topo é colocada sobre a amostra, de forma a que fique o mais próximo da célula de carga, havendo o cuidado de não ser aplicada qualquer força. O ensaio de compressão não confinada termina após 30min, ou seja, para uma extensão axial de cerca de 30%. Por último, retira-se o provete de solo ensaiado e divide-se em 3 porções, sendo as extremidades utilizadas para a realização de Imagens SEM, enquanto que o meio é usado para medição do teor em água.

Através dos ensaios UCS, obtém-se a carga aplicada no provete, em N, e os deslocamentos verticais contabilizados pelo transdutor de deslocamentos, em mm. A partir dos valores de origem, calcula-se a resistência à compressão não confinada, q_u , quociente entre a força aplicada (F) e a área corrigida da secção transversal (A_c), Eq. 4.2. A área da secção

transversal é corrigida pelo facto de existirem deformações radiais no provete no decorrer do ensaio (Eq. 4.3).

$$q_u = \frac{F}{A_c} \quad (4.2)$$

$$A_c = \frac{\pi \times D^2}{4(1 - \frac{\varepsilon_a}{100})} \quad (4.3)$$

Na Eq. 4.3, D é o diâmetro inicial da área transversal do provete e ε_a é a extensão axial.

Para além da resistência à compressão não confinada, calcula-se a extensão (ε_a), quociente entre a deformação volumétrica ($\Delta\delta_v$) e a altura do provete (h) isto em percentagem. (Eq. 4.4)

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta\delta_v}{h} \times 100 \quad (4.4)$$

Em geral, é necessário corrigir os “bedding-errors”, os quais aparecem na zona inicial do curva tensão-extensão (q_u - ε_a) e sua origem provém de ajustes iniciais do aparelho de medição e por esse motivo devem ser eliminados de maneira a não comprometerem os resultados obtidos. A Figura 3.1 ilustra o processo de correção dos “bedding-errors”, consistindo no ajuste da curva tensão-extensão axial de modo que o início do ensaio corresponda a tensão e deformação axial nulas.

Com a curva tensão-extensão corrigida, extrai-se o valor máximo da resistência à compressão não confinada (q_u), correspondente à rotura do provete. De seguida, define-se o ponto no gráfico que representa 50% deste último parâmetro (q_{u50}) e a correspondente extensão axial (ε_{u50}), de modo a calcular o módulo de deformabilidade (E_{u50}), a partir da seguinte expressão.

$$E_{u50} = \frac{q_{u50}}{\varepsilon_{u50}} \quad (4.5)$$

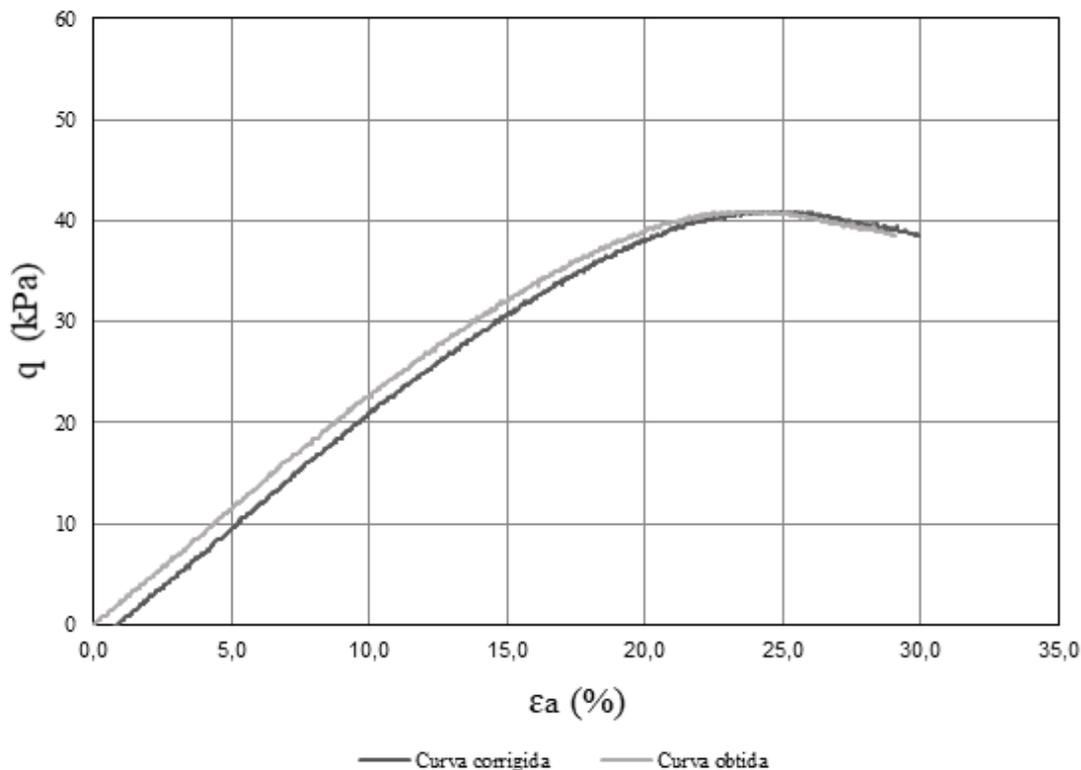


Figura 4.11 - Correção “bedding-errors” - Amostra 5,5%OM + Xantano.

4.5. Ensaio Edométrico

Os 20 tubos (10 com Xantano para os vários teores em matéria orgânica + 10 sem Xantano para os vários teores em matéria orgânica) foram ensaiados de acordo com a Norma BS 1377-5 (1990), de forma a serem obtidos os parâmetros relativos à compressibilidade do solo e coeficiente de consolidação.

4.5.1. Equipamento

Estes ensaios foram realizados em 4 edômetros do laboratório de Geotecnia do DEC/UC (Figuras 4.12 e 4.13).



Figura 4.12 - Edómetro 2 e 3.



Figura 4.13 - Edómetro 4 e 7.

Cada edómetro é constituído por um suporte para colocação de pesos, um braço da alavanca com contrapeso, um parafuso que impossibilita o movimento da alavanca, uma célula edométrica e um transdutor de deslocamento que mede as deformações.

4.5.2. Descrição do ensaio

Após extração do solo preparado no tubo em PVC (Figura 4.13), cravou-se o respetivo anel edométrico para obtenção dos provetes com as dimensões adequadas para ensaio ($d= 70 \text{ mm}$, $h= 20\text{mm}$) (Figura 4.14).



Figura 4.14 - Amostra 5,5%OM + Xantano após 14 dias de cura.



Figura 4.15 - Cravação do anel edométrico na amostra 5,5%OM + Xantano.

De seguida, retirou-se o excesso de solo e retificam-se as faces superior e inferior da amostra, criando superfícies lisas e sem bolhas de ar.

A amostra é colocada na célula de consolidação, entre duas pedras porosas (previamente saturadas) e com papel de filtro molhado entre elas, para evitar a contaminação/colmatação da pedra porosa. De seguida, foi inserida a peça de fixação do anel e por último, a placa de topo foi colocada na célula edométrica.

Após fixação da célula edométrica no edómetro, deu-se início ao carregamento da amostra, tendo os pesos sido aplicados no braço de carga da alavanca com um fator multiplicativo de 11,04.

Para cada amostra houve duas etapas. A primeira etapa foi a fase de carregamento, composta por 8 patamares, com uma duração mínima de 6 horas/cada. Esta fase começou nos 0,250kg e foi sendo duplicada, terminando nos 32kg. A segunda etapa foi a fase de descarga,

composta por 4 patamares, reduzindo a carga para um quarto da carga precedente, com a mesma duração entre cada patamar.



Figura 4.16 - Amostra com 7,7%OM + Xantano no início do ensaio.

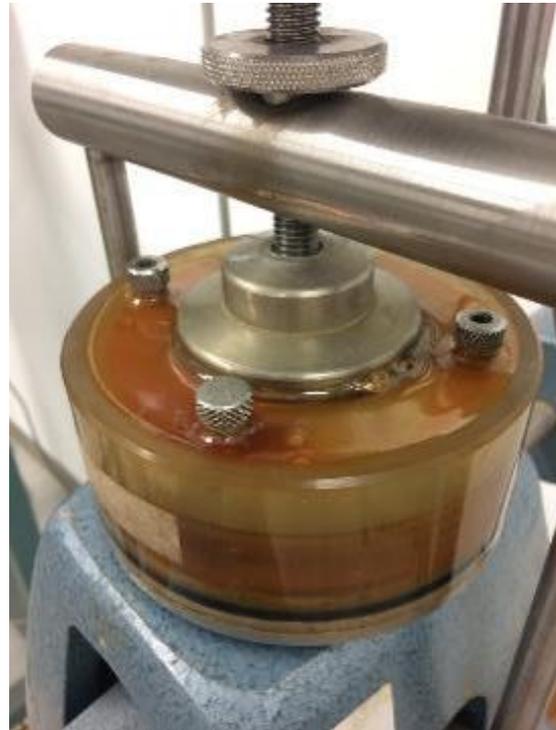


Figura 4.17 - Amostra com 7,7%OM + Xantano no fim do ensaio.

As deformações da amostra em relação ao tempo foram sendo registadas através do programa TRIAX.

No fim de cada ensaio retirou-se o anel edométrico da respetiva célula e pesou-se o seu conjunto anel edométrico + amostra húmida e posteriormente colocou-se na estufa para secagem, durante 24 horas. Conhecendo todos os pesos, foi possível calcular o teor em água final das várias amostras.

A partir do método de Casagrande, calculou-se o coeficiente de consolidação (C_v), para o qual é necessário obter o valor do tempo correspondente a 50% de consolidação (t_{50}), processo ilustrado na Figura 4.18.

Posto isto, através da expressão (5.1), para $T_v=0,196$ (correspondente a 50% da consolidação) e considerando d o caminho máximo de drenagem da amostra (igual a metade da espessura da amostra porque a drenagem é feita pelo topo e base), obteve-se o valor de C_v .

$$C_v = \frac{T_v \times d^2}{t_{50}} \quad (5.1)$$



Figura 4.18 - Aplicação do Método de Casagrande.

A aplicação deste método foi feita para todas as amostras, com e sem Xantano, para o escalão de carga 32kg e escalão de descarga 8kg.

4.6. Imagens SEM (Scanning Electron Microscope)

De maneira a confirmar a existência do biopolímero Xantano nas amostras de solo estabilizado recorreu-se a imagens SEM. Para além de confirmar a presença do estabilizante, através da sua análise microscópica, compara-se as amostras de solos tratado e não tratado tanto a nível estrutural como a nível químico. Estas imagens são obtidas através um microscópio electrónico Zeiss Merlin Gemini, nas instalações do IPN. (Figura 4.17.)



Figura 4.19 - Equipamento necessário - Imagens SEM.

Inicialmente é aplicada uma camada de ouro (Au) sobre as amostras (Figura 4.18), de maneira a melhorar o seu potencial condutor. De seguida, com recurso ao microscópio referenciado, realizou-se um varrimento de um raio de eletrões onde posteriormente foram capturadas imagens que serão apresentadas no Cap.5.



Figura 4.20 - Amostras utilizadas para Imagens SEM, com e sem Xantano para os diferentes teores em matéria orgânica.

4.7. Plano de ensaios

Por último, é apresentado um plano relativo à realização dos ensaios necessários para execução do presente trabalho.

%OM	Dosagem de Xantano (%)	Tempo de cura (dias)	Ensaio UCS		Ensaio Edométrico	
			Nº de provetes ensaiados (un)	Nº de medições de teor em água/provete	Nº de provetes ensaiados (un)	Nº de medições de teor em água/provete
1,50%	0	0	3	1	2	1
2,40%	0	0	3	1	2	1
4,10%	0	0	3	1	2	1
5,50%	0	0	3	1	2	1
7,70%	0	0	3	1	2	1
1,50%	1	14	3	1	2	1
2,40%	1	14	3	1	2	1
4,10%	1	14	3	1	2	1
5,50%	1	14	3	1	2	1
7,70%	1	14	3	1	2	1

Tabela 4.4 - Plano de ensaios para o presente trabalho.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

No presente capítulo, são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios UCS e edométricos, para provetes com teores em de matéria orgânica de 1,5%, 2,4%, 4,1%, 5,5% e 7,7%, não estabilizados e estabilizados com 1% de Xantano e para um tempo de cura de 14 dias.

Os parâmetros que serão abordados e discutidos nos itens seguintes 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) e o coeficiente de consolidação (C_v). Por último, são também apresentadas Imagens SEM (Scanning Electron Microscope), com o objetivo de analisar o eventual efeito da bioestabilização na microestrutura do solo e encontrar vestígios de Xantano nas amostras bioestabilizadas.

5.1. Ensaio UCS

Na Tabela 5.1 apresenta-se um resumo dos resultados (q_u e E_{u50}) obtidos nos ensaios UCS, os quais serão pormenorizados e analisados nos itens seguintes.

OM (%)	Xantano (%)	Provete n°	q_u máx (kPa)	q_u médio (kPa)	E_{u50} (MPa)	E_{u50} médio (MPa)
1,50	0	T1	22,07	22,50	0,12	0,12
	0	T2	23,36		0,11	
	0	T3	22,07		0,12	
2,40	0	T1	23,33	23,31	0,17	0,13
	0	T2	22,86		0,12	
	0	T3	23,74		0,12	
4,1	0	T1	17,05	15,73	0,12	0,09
	0	T2	14,18		0,08	
	0	T3	15,97		0,09	
5,5	0	T1	11,28	12,44	0,07	0,07
	0	T2	13,02		0,08	
	0	T3	13,02		0,06	
7,7	0	T1	12,92	14,06	0,08	0,08
	0	T2	15,31		0,10	
	0	T3	13,96		0,07	

a)

OM (%)	Xantano (%)	Provette nº	q _u máx (kPa)	q _u médio (kPa)	E _u 50 (MPa)	E _u 50 médio (MPa)
1,50	1	T1	51,56	51,17	0,23	0,22
	1	T2	51,77		0,23	
	1	T3	50,16		0,20	
2,40	1	T1	52,83	54,61	0,22	0,23
	1	T2	56,43		0,23	
	1	T3	54,57		0,23	
4,1	1	T1	49,25	45,46	0,27	0,24
	1	T2	41,80		0,22	
	1	T3	45,35		0,25	
5,5	1	T1	41,57	40,47	0,23	0,22
	1	T2	40,92		0,23	
	1	T3	38,92		0,21	
7,7	1	T1	7,08	6,51	0,06	0,06
	1	T2	6,31		0,08	
	1	T3	6,14		0,04	

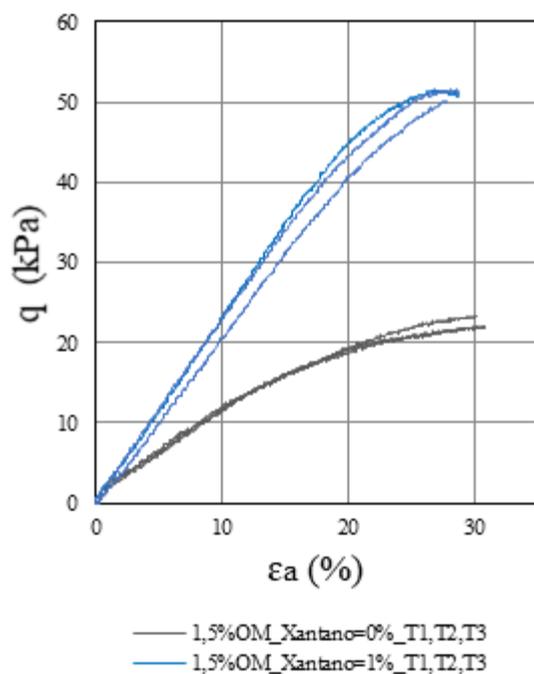
b)

Tabela 5.1 - Resumo dos valores obtidos nos ensaios UCS. a) Amostras não estabilizadas; b) Amostras bioestabilizadas.

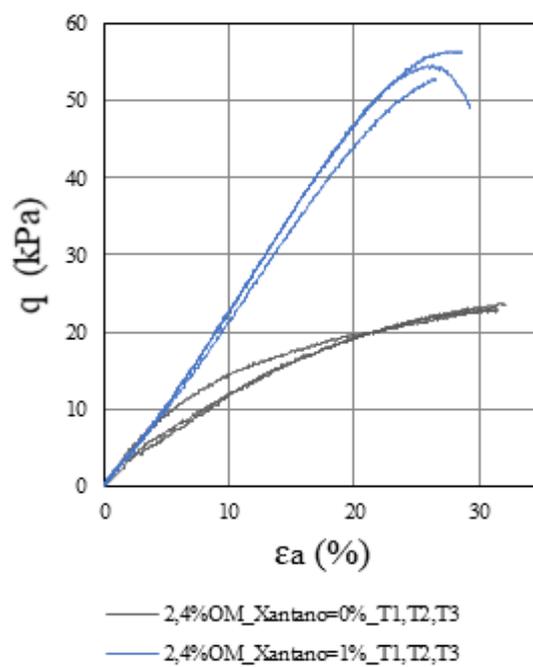
5.1.1. Resistência à compressão (q_u) e módulo de deformabilidade (E_{u50})

Na Figura 5.1 apresentam-se as curvas tensão-extensão axial (q_u-ε_{ax}) obtidas nos ensaios UCS para os diferentes teores em matéria orgânica, tanto em amostras não estabilizadas como para amostras bioestabilizadas com Xantano. Independentemente da estabilização ou não, em todos os provetes constata-se que a rotura ocorre para níveis elevados de extensão axial (superior a 20%), observando-se nos provetes bioestabilizados uma tendência para a perda de resistência pós-pico, ou seja, a bioestabilização tende a induzir um comportamento mais frágil que o observado no solo não estabilizado.

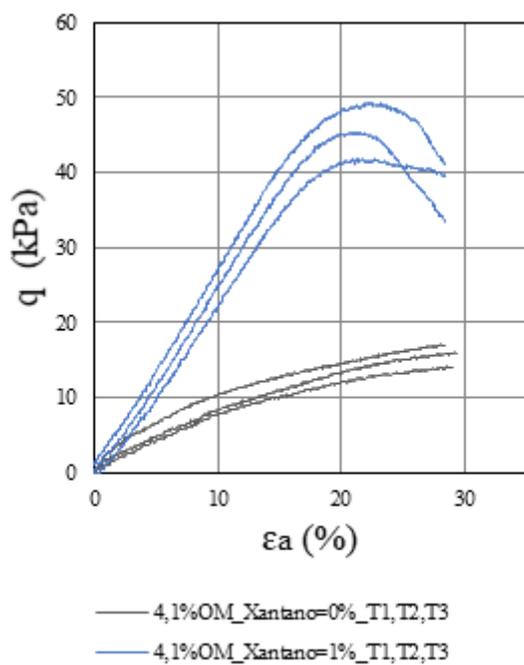
Na figura também se observa, para teores em matéria orgânica de 1,5%, 2,4%, 4,1% e 5,5%, um aumento considerável de resistência e da rigidez após a bioestabilização com Xantano, o que não acontece com o solo natural (OM=7,7%), onde se verifica o oposto, ou seja, um efeito negativo do processo de bioestabilização.



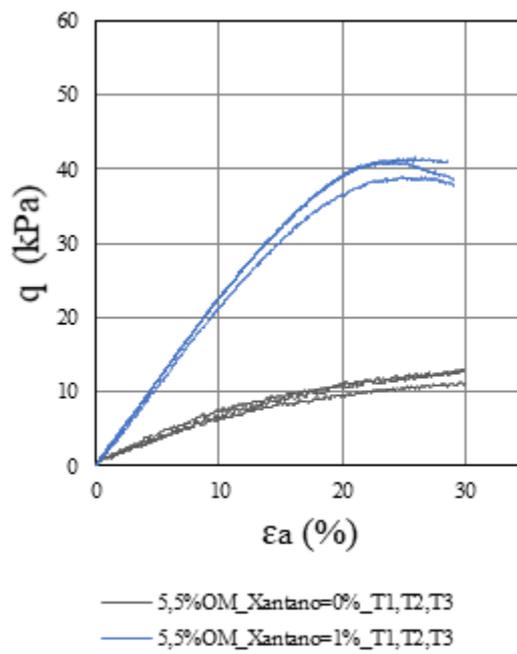
a)



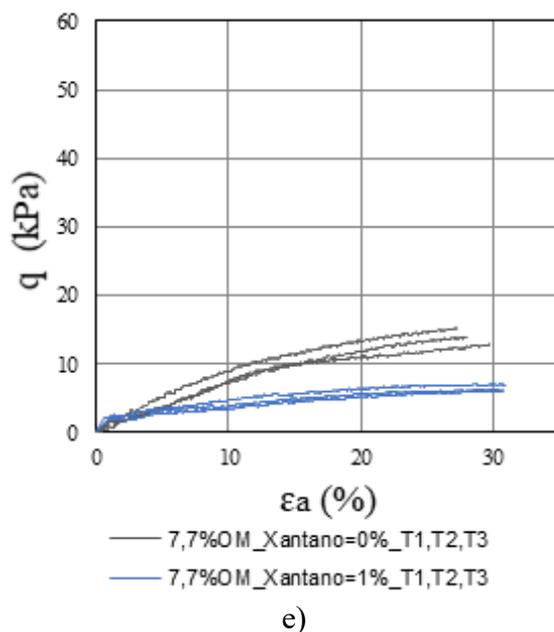
b)



c)



d)



e)
 Figura 5.1 - Curva tensão-extensão axial para as diferentes percentagens de matéria orgânica em amostras não estabilizadas e estabilizadas com Xantano. a) OM = 1,5%; b) OM= 2,4%; c) OM= 4,1%; d) OM= 5,5%; e) OM= 7,7%.

O efeito do processo de bioestabilização em termos de q_u e de Eu_{50} é evidenciado nas Figuras 5.2 e 5.3, respetivamente, constatando-se a existência de alguma dispersão nos resultados, a qual é superior em termos de Eu_{50} .

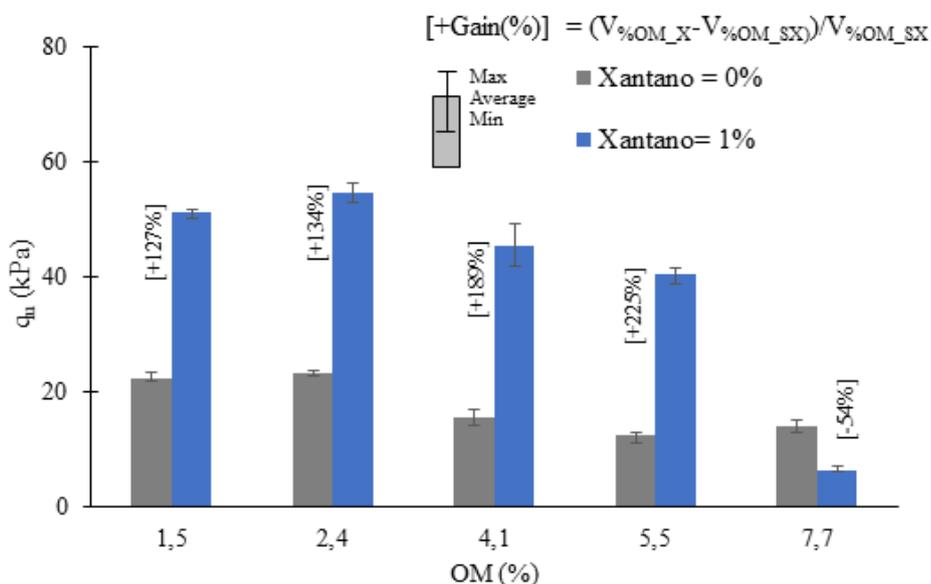


Figura 5.2 - Resistência à compressão não confinada para as diferentes percentagens de matéria orgânica, e respetivos ganhos com a bioestabilização.

Nas Figuras 5.2 e 5.3 observa-se que a amostra com OM=5,5% registou o maior aumento de resistência à compressão não confinada e do módulo de deformabilidade com a aplicação de Xantano, registrando um ganho de cerca de 225% e de 216%, respetivamente. Por outro lado, a bioestabilização do solo natural com OM=7,7% revelou ter um efeito contraproducente, tanto em termos de q_u como de E_{u50} .

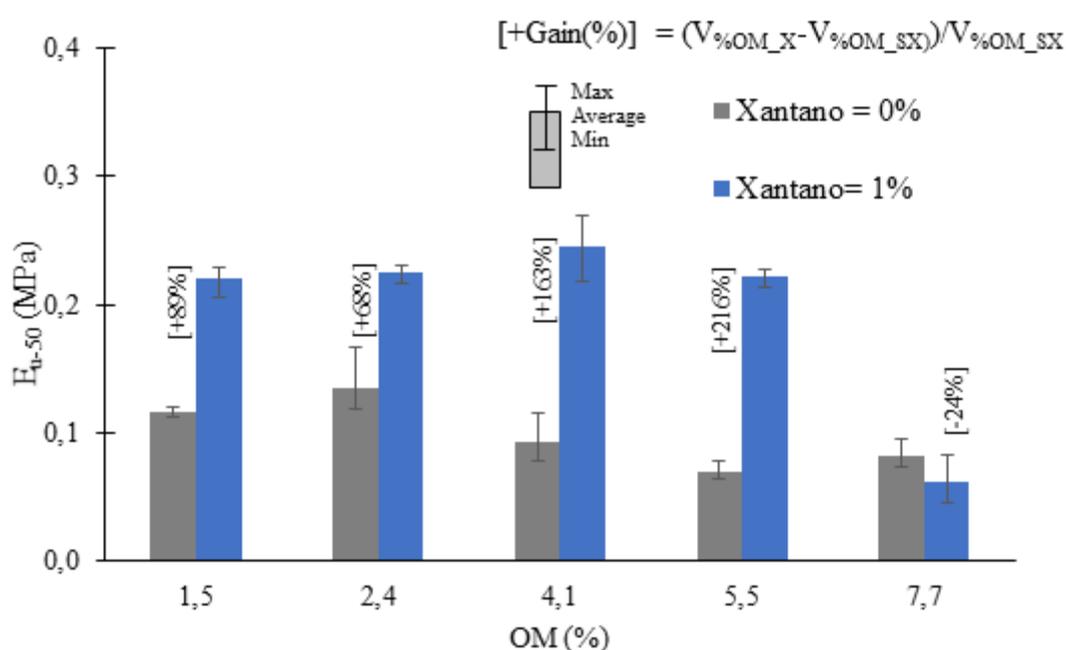


Figura 5.3 - Módulo de deformabilidade para as diferentes percentagens de matéria orgânica e respetivos ganhos com a bioestabilização.

5.2. Ensaios Edométricos

Nas Tabelas 5.2 e 5.3 apresenta-se um resumo dos resultados (C_c , C_r e C_v) obtidos nos ensaios edométricos, os quais serão pormenorizados e analisados nos itens seguintes.

OM (%)	Xantano (%)	Provetete nº	Cr	Cr médio	Cc	Cc médio
1,50	0	T1	0,033	0,035	0,173	0,168
	0	T2	0,037		0,164	
2,40	0	T1	0,036	0,034	0,192	0,183
	0	T2	0,032		0,173	
4,10	0	T1	0,033	0,033	0,181	0,173
	0	T2	0,032		0,165	
5,50	0	T1	0,037	0,038	0,210	0,210
	0	T2	0,039		0,210	
7,70	0	T1	0,046	0,044	0,235	0,243
	0	T2	0,041		0,251	
1,50	1	T1	0,046	0,044	0,197	0,195
	1	T2	0,042		0,194	
2,40	1	T1	0,046	0,044	0,242	0,228
	1	T2	0,042		0,213	
4,10	1	T1	0,044	0,043	0,261	0,277
	1	T2	0,043		0,292	
5,50	1	T1	0,040	0,043	0,263	0,278
	1	T2	0,046		0,292	
7,70	1	T1	0,054	0,059	0,373	0,414
	1	T2	0,063		0,456	

Tabela 5.2 - Resumo dos valores obtidos nos ensaios edométricos, Cr e Cc.

OM (%)	Xantano (%)	Provetete nº	Coeficiente de consolidação (Cv)				Índice de Vazios (e)			
			Escalão de carga (450-900 kPa)	Escalão de carga (450-900 kPa) média	Escalão de descarga (900-225kPa)	Escalão de descarga (900-225kPa) média	e inicial	e inicial médio	e final	e final médio
1,50	0	T1	36,100	35,669	33,147	30,342	0,831	0,806	0,657	0,638
	0	T2	35,238		27,538		0,781		0,618	
2,40	0	T1	33,823	34,870	14,060	20,908	0,861	0,894	0,687	0,706
	0	T2	35,918		27,755		0,927		0,726	
4,10	0	T1	38,961	33,283	25,666	33,362	0,890	0,869	0,697	0,691
	0	T2	27,606		41,059		0,849		0,684	
5,50	0	T1	22,244	22,226	25,083	24,210	0,961	0,960	0,721	0,716
	0	T2	22,208		23,337		0,959		0,711	
7,70	0	T1	8,627	13,933	24,953	21,751	1,163	1,070	0,921	0,832
	0	T2	19,239		18,549		0,977		0,744	

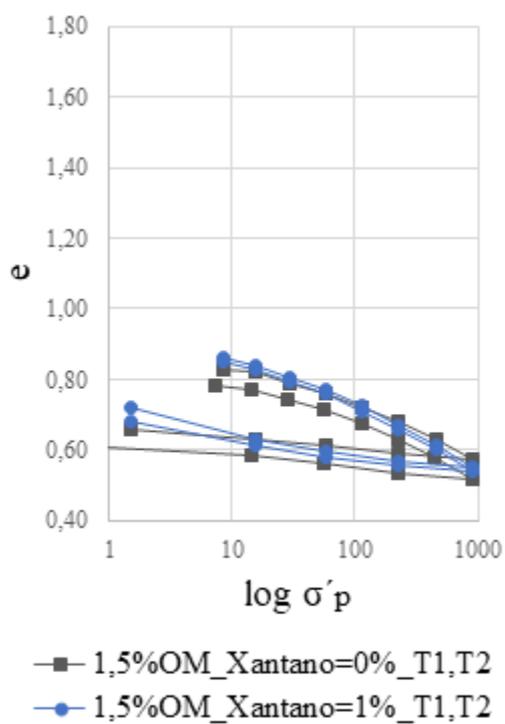
a)

OM (%)	Xantano (%)	Provetes n°	Coeficiente de consolidação (C _v)				Índice de Vazios (e)			
			Escalão de carga (450-900 kPa)	Escalão de carga (450-900 kPa) média	Escalão de descarga (900-225kPa)	Escalão de descarga (900-225kPa) média	e _{inicial}	e _{inicial médio}	e _{final}	e _{final médio}
1,50	1	T1	2,958	3,053	32,774	24,437	0,864	0,857	0,720	0,701
	1	T2	3,149		16,101		0,849		0,681	
2,40	1	T1	4,550	4,092	18,050	23,758	0,992	0,920	0,790	0,721
	1	T2	3,635		29,466		0,847		0,653	
4,10	1	T1	22,841	15,420	35,592	29,280	1,061	1,083	0,816	0,810
	1	T2	7,998		22,968		1,105		0,803	
5,50	1	T1	3,221	3,622	31,866	27,508	0,977	1,054	0,713	0,784
	1	T2	4,023		23,150		1,131		0,855	
7,70	1	T1	0,709	0,617	0,367	4,836	1,276	1,461	0,707	0,826
	1	T2	0,524		9,306		1,646		0,944	

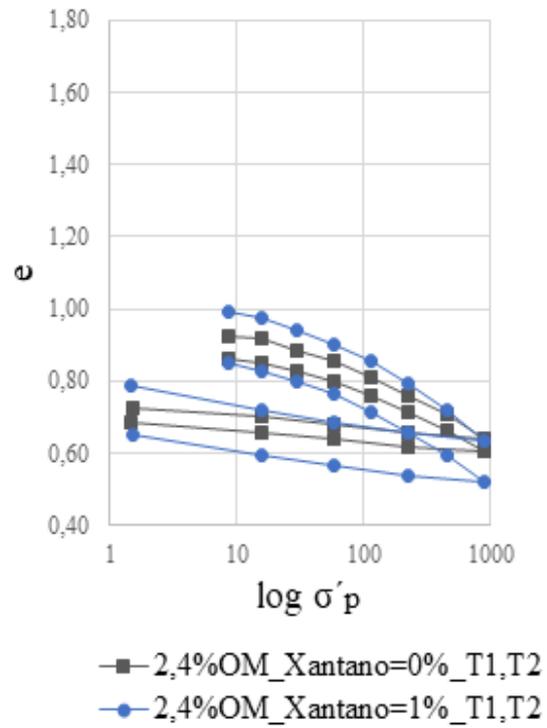
b)

Tabela 5.3 - Resumo dos valores obtidos nos ensaios edométricos, C_v, e_{inicial} e e_{final}. a) Amostras não estabilizadas; b) Amostras bioestabilizadas.

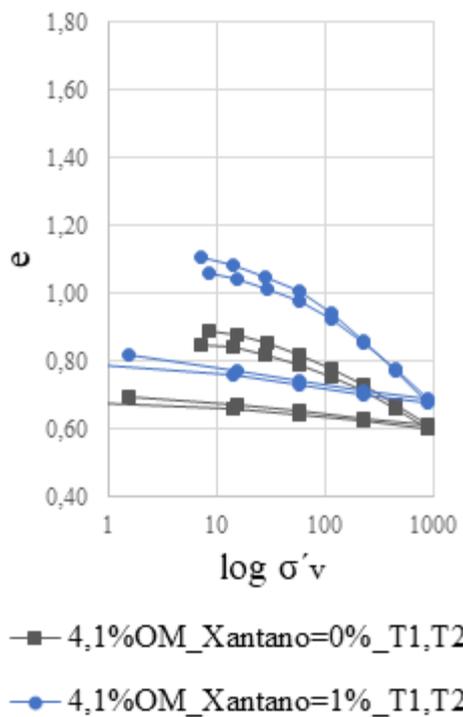
Na Figura 5.4 apresentam-se as curvas e-log σ'_p obtidas nos ensaios edométricos para os diferentes teores em matéria orgânica, em provetes não estabilizados e estabilizados com Xantano. Os resultados mostram um aumento da dispersão com o incremento do teor em matéria orgânica, o que reflete alguma dificuldade de homogeneização da mistura (solo-biopolímero). Tanto para o solo estabilizado como não estabilizado, observa-se também que o solo natural (OM=7,7%) é aquele que sofre maior variação do índice de vazios, para a mesma variação de tensão, refletindo a expectável e significativa influência da matéria orgânica na deformabilidade dos solos. Na Figura 5.4 constata-se igualmente o aumento do índice de vazios com o teor de matéria orgânica, sendo este efeito potenciado nos provetes estabilizados com Xantano.



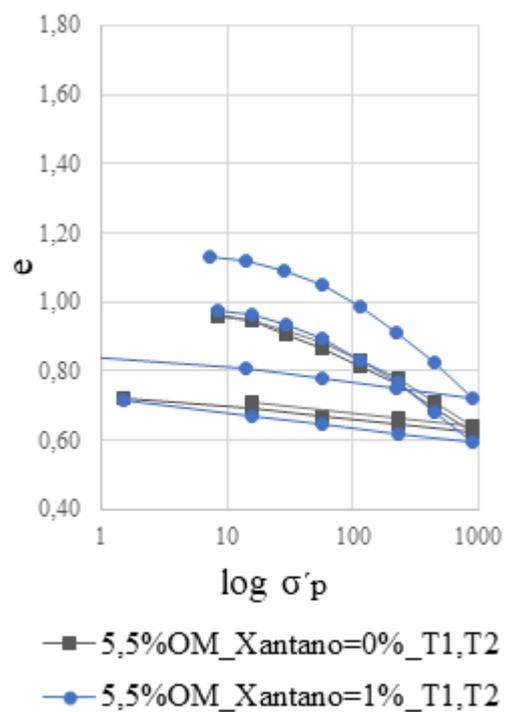
a)



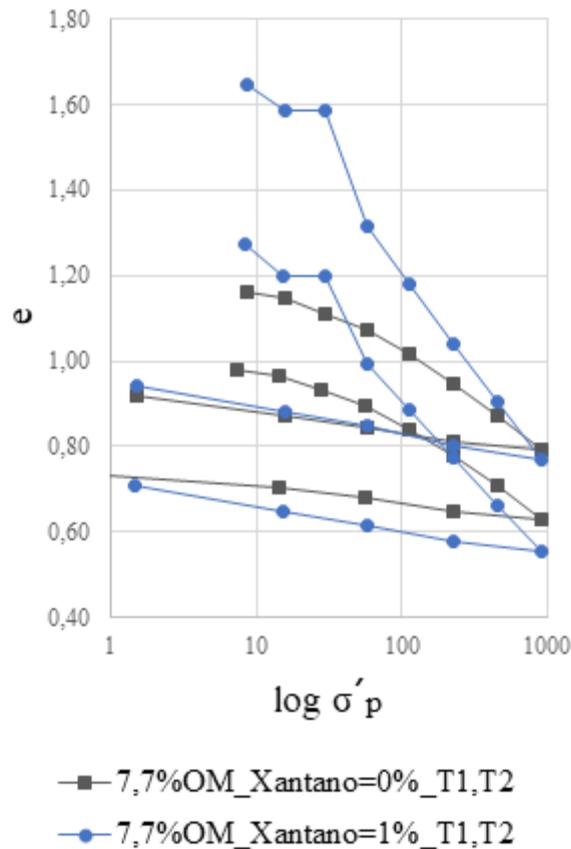
b)



c)



d)

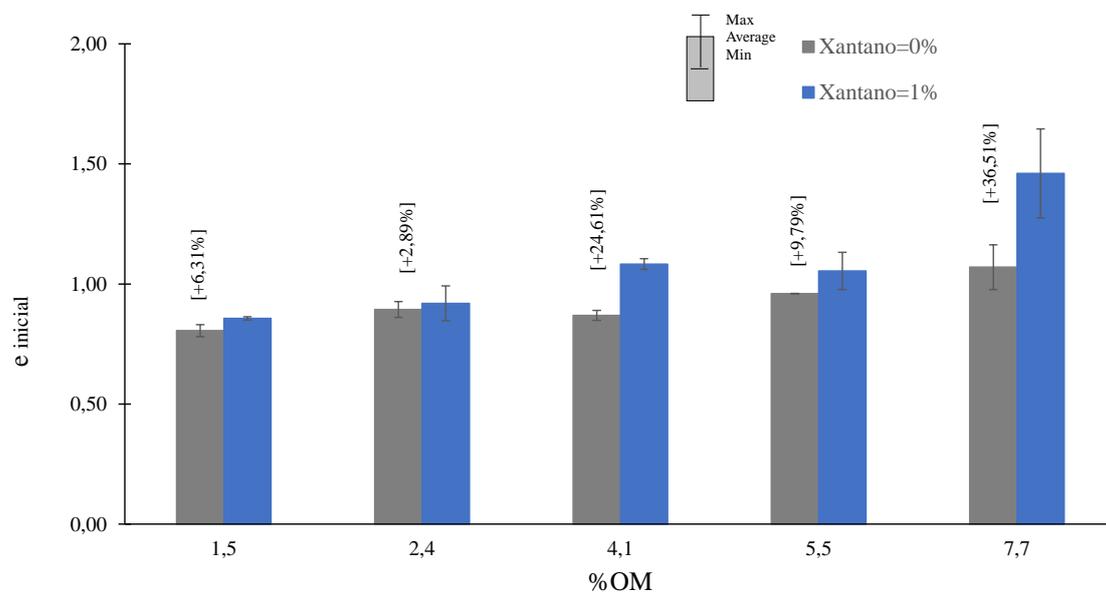


e)

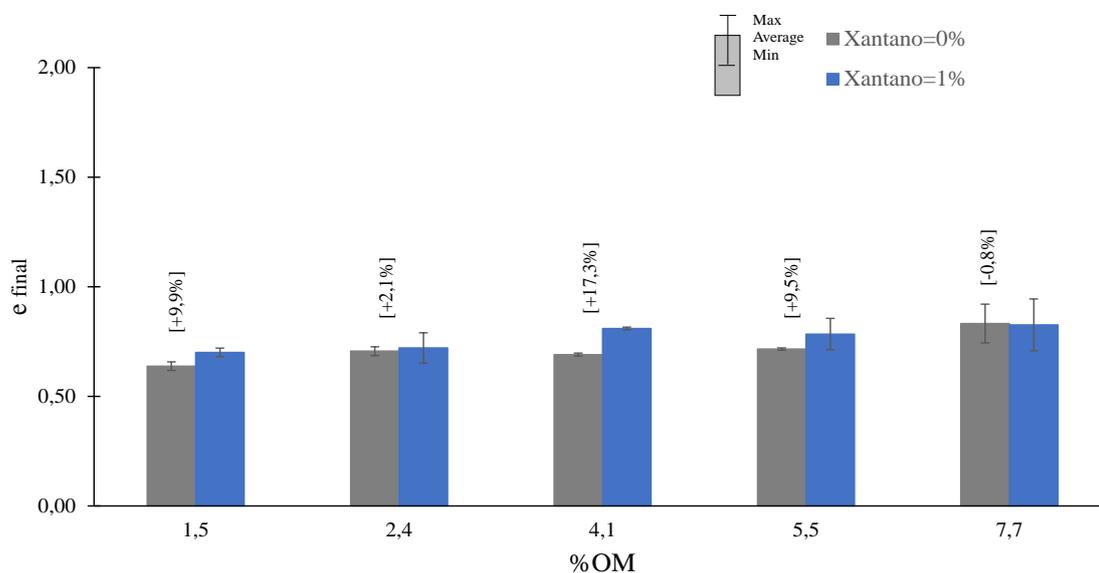
Figura 5.4 - Curva e-log $\sigma'p$ obtidas nos ensaios edométricos para as diferentes percentagens de matéria orgânica em amostras não estabilizadas e estabilizadas com Xantano. a) OM = 1,5%; b) OM= 2,4%; c) OM= 4,1%; d) OM= 5,5%; e) OM= 7,7%.

A Figura 5.5 evidencia bem o aumento do índice de vazios inicial e final com o teor de matéria orgânica, sendo este feito mais significativo nos provetes estabilizados com Xantano, tal como observado na Figura 5.4. Nos provetes de solo estabilizado com OM=7,7%, observa-se um índice de vazios inicial de aproximadamente 1,50 e um índice de vazios final de aproximadamente 0,80. O aumento do índice de vazios após estabilização está em linha com o observado por Cabral (2020) sendo esta tendência uma consequência

da elevada capacidade do biopolímero para absorver e reter água, devido à hidratação dos hidrogéis.



a)



b)

Figura 5.5 - Variação do índice de vazios para as diferentes percentagens de matéria orgânica em amostras não estabilizadas e estabilizadas com Xantano. a) Índice de vazios inicial; b) Índice de vazios final.

Nas Figuras 5.6 e 5.7 apresentam-se as variações dos índices de compressibilidade (C_c) e do índice de recompressibilidade (C_r) extraídas das curvas edométricas para as diferentes percentagens de matéria orgânica, em provetes não estabilizados e estabilizados com Xantano.

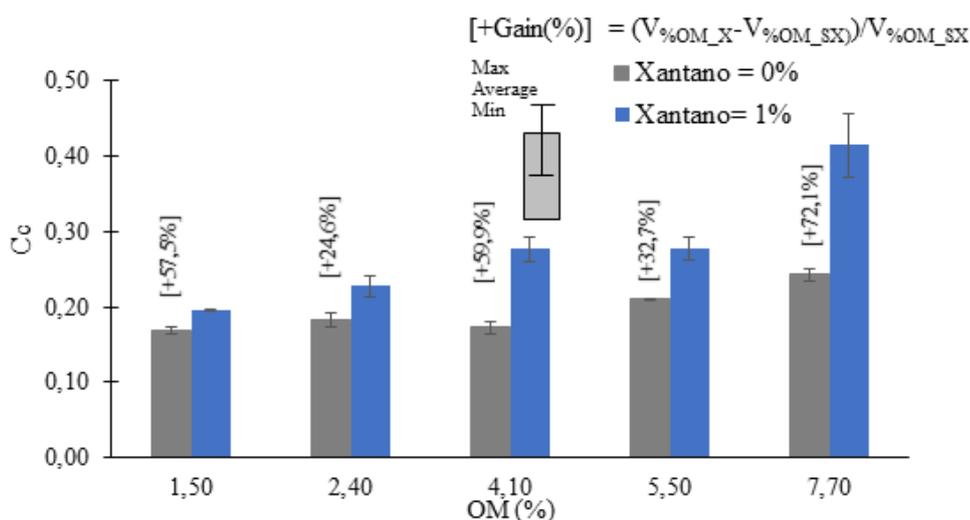


Figura 5.6 - Variação do C_c para os diferentes para as diferentes percentagens de matéria orgânica, em provetes não estabilizados e estabilizados com Xantano.

Os resultados mostram que o índice de compressibilidade, C_c , (Figura 5.6) aumenta com o aumento do teor em matéria orgânica, tanto para os provetes estabilizados bem como para os não estabilizados, registando-se um crescimento mais acentuado para as amostras bioestabilizadas, o que revela uma maior compressibilidade destes provetes. Naturalmente, este comportamento está associado a maiores índices de vazios iniciais e à maior capacidade de absorção de água nos provetes bioestabilizados.

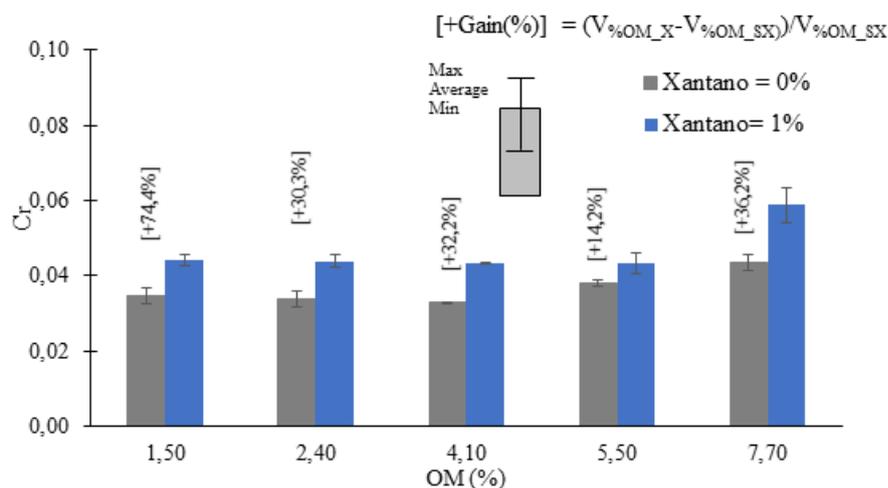


Figura 5.7 - Variação do Cr para os diferentes para as diferentes percentagens de matéria orgânica, em provetes não estabilizados e estabilizados com Xantano.

Para o índice de recompressibilidade (Figura 5.7), o crescimento já não é tão acentuado como para o índice de compressibilidade, mas verifica-se em termos qualitativos uma tendência semelhante.

Na Figura 5.8 apresenta-se a variação do coeficiente de consolidação, C_v , para as diferentes percentagens de matéria orgânica, referentes ao último escalão de carga (450-900 kPa) e primeiro escalão de descarga (900-225kPa). Observa-se que existe uma relação inversamente proporcional entre a percentagem de matéria orgânica e o valor de C_v , uma vez que este toma o maior valor para a amostra com menor teor em matéria orgânica. Constatase também que o coeficiente de consolidação é superior para amostras não estabilizadas, pois o tempo de consolidação para estas amostras é inferior ao observado em amostras bioestabilizadas (Xantano=1%). Estes resultados sugerem que água retida pelos hidrogéis do biopolímero tem grande dificuldade em percolar, ou seja, o coeficiente de permeabilidade do solo estabilizado tende a ser inferior ao do solo não estabilizado. Estes resultados corroboram com Kwon et al. (2019), no que diz respeito à diminuição do coeficiente de consolidação induzido pelo processo de bioestabilização.

Na Figura 5.8 também se verifica que nas amostras bioestabilizadas o coeficiente de consolidação é superior na descarga (900-225kPa) do que na carga (450-900 kPa), o que está em linha com o observado na generalidade dos solos, em resultado de na descarga existir uma pequena variação de índice de vazios à qual está associada uma maior rigidez.

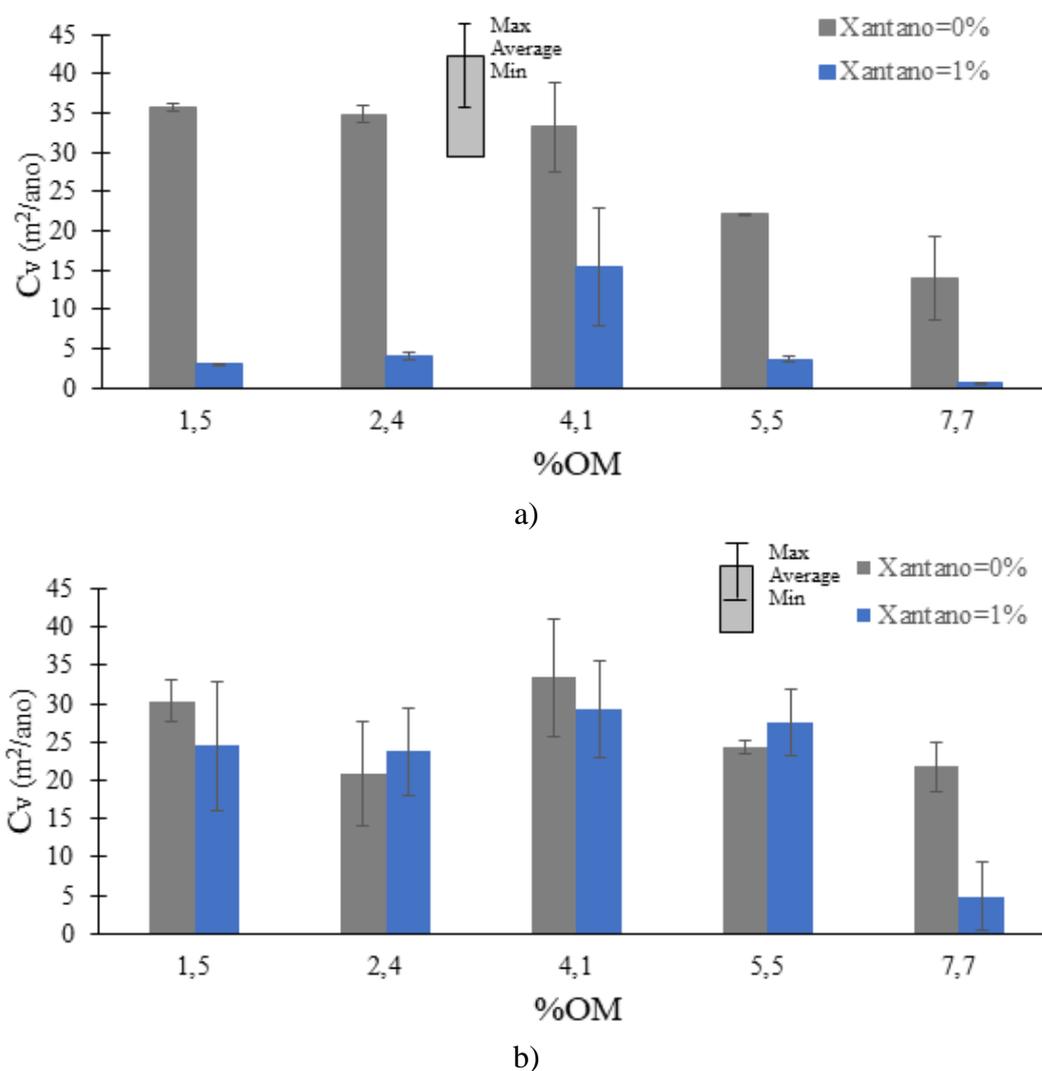


Figura 5.8 - Variação do coeficiente de consolidação, C_v , para as diferentes percentagens de matéria orgânica em amostras não estabilizadas e bioestabilizadas. a) Escalão de carga (450-900 kPa); b) Escalão de descarga (900-225kPa)

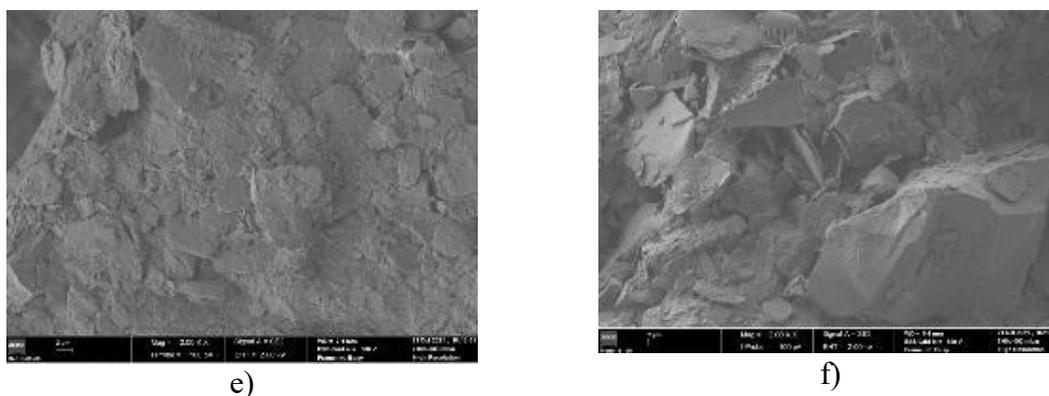
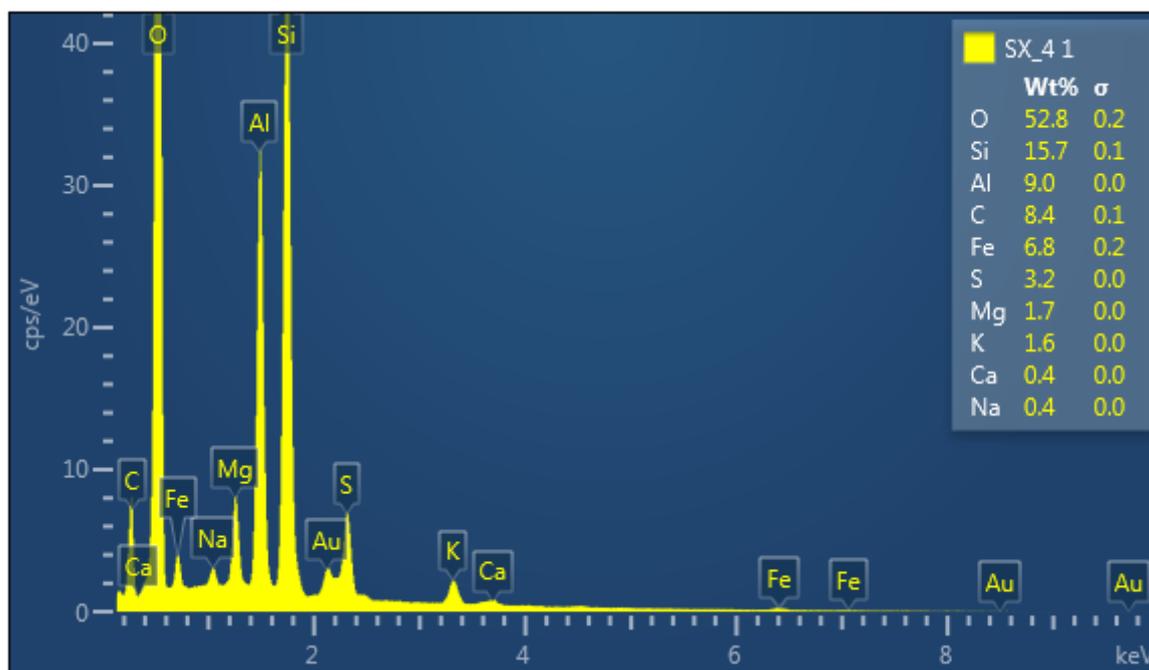


Figura 5.9 – Imagens SEM da estrutura do solo para as diferentes percentagens de matéria orgânica em amostras não estabilizadas e bioestabilizadas, ampliadas 2000X. a) OM=1,5% não estabilizada; b) OM=1,5% bioestabilizada; c) OM=4,1% não estabilizada; d) OM=4,1% bioestabilizada; e) OM=7,7% não estabilizada; f) OM=7,7% bioestabilizada.

Na Figura 5.10 apresenta-se a composição química de uma amostra não estabilizada e bioestabilizada (OM=4,1%). Observa-se que os elementos predominantes são o Oxigénio, Sílica e Magnésio. De facto, os resultados são inconclusivos, dado não confirmarem a existência de Xantano, o qual levaria a um acréscimo de oxigénio e carbono nos provetes bioestabilizados,



a)

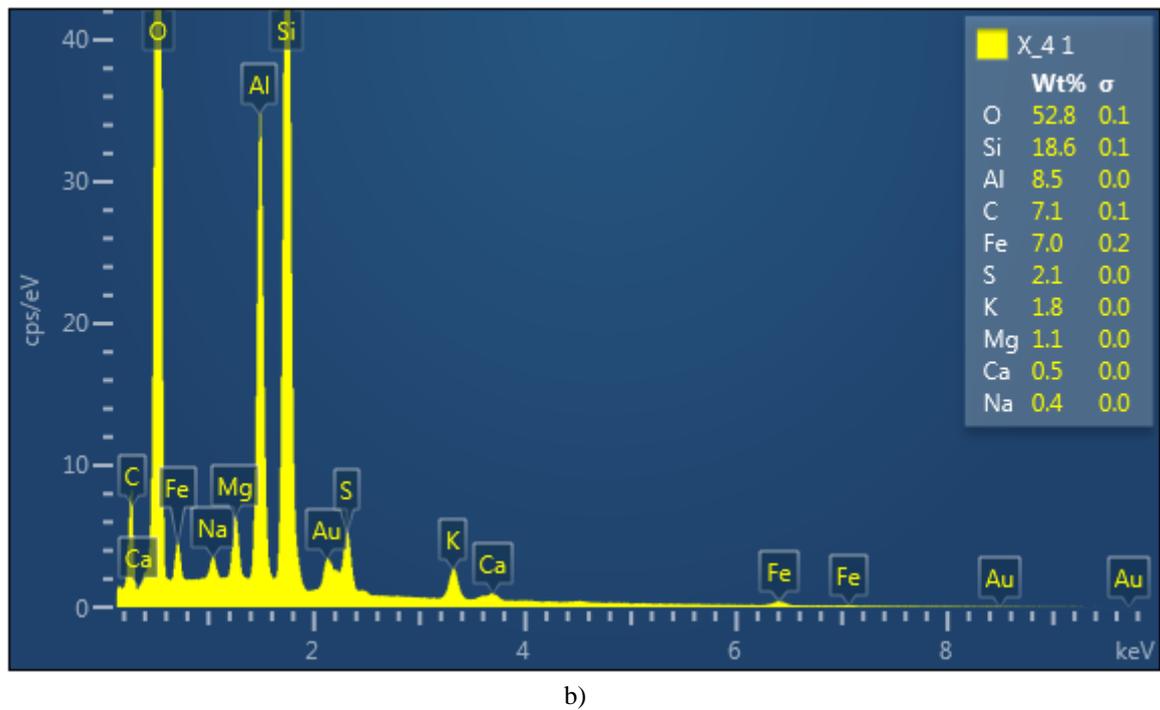


Figura 5.10 - Imagens SEM da composição química do solo. a) OM=4,1% não estabilizada; b) OM=4,1% bioestabilizada.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. Conclusões

A presente dissertação tem como finalidade analisar o efeito do teor de matéria orgânica no comportamento mecânico de um solo bioestabilizado com o biopolímero Xantano. Este estudo incidiu sobre 5 teores em matéria orgânica, com provetes não estabilizados e estabilizados com 1% de Xantano. O estudo compreendeu a realização de ensaios UCS e edométricos, tendo-se estudado o efeito do teor em matéria orgânica na resistência à compressão não confinada, módulo de deformabilidade, compressibilidade e consolidação primária do solo. Complementarmente realizaram-se Imagens SEM para tentar identificar a presença do biopolímero. As principais conclusões do trabalho são enunciadas de seguida:

- i. A resistência à compressão não confinada e o módulo de deformabilidade diminuem com o aumento do teor de matéria orgânica, tanto no solo não estabilizado como no solo estabilizado.
- ii. O efeito da bioestabilização é positivo nos provetes com teores em matéria orgânica inferior a 5,5%, originando um aumento de q_u e Eu_{50} em relação aos provetes não estabilizados. Contudo, nos provetes com maior teor em matéria orgânica (7,7%) o efeito da bioestabilização é negativo, induzindo um decréscimo da resistência e da deformabilidade, ou seja, teores em matéria orgânica parecem impedir o estabelecimento de ligações entre as partículas.
- iii. De uma maneira geral, o índice de vazios aumenta com o aumento do teor de matéria orgânica. Este fenómeno intensifica-se em amostras bioestabilizadas com Xantano, devido à grande capacidade de absorção de água deste biopolímero.
- iv. O índice de compressibilidade e o índice de recompressibilidade aumentam com o aumento do teor de matéria orgânica, sendo que este crescimento é mais acentuado para o índice de compressibilidade.

- v. O coeficiente de consolidação tende a diminuir com o aumento do teor de matéria orgânica, mostrando-se superior no patamar de descarga (900-225kPa) comparativamente ao patamar de carga (450-900kPa).
- vi. A bioestabilização com Xantano origina o aumento dos coeficientes de compressibilidade e de recompressibilidade e uma diminuição do coeficiente de consolidação, ou seja, a água é retida nos hidrogéis do biopolímero, tendo maior dificuldade em percolar, retardando o processo de consolidação.
- vii. Esta solução não será adequada para problemas de assentamentos, devido à grande compressibilidade que o solo bioestabilizado apresenta.
- viii. A aplicação do Xantano terá grande interesse para obras de curta duração e para situações frágeis do ponto de vista ambiental.
- ix. As Imagens SEM não são conclusivas em relação à presença de Xantano no solo bioestabilizado.

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. Realização de ensaios triaxiais drenados e não drenados, em trajetórias de compressão e extensão, em solos estabilizados com Xantano.
- ii. Realização de Ensaio Edométrico de longa duração para caracterização da consolidação secundária de provetes biestabilizados com Xantano.
- iii. Realização de ensaios cíclicos de provetes estabilizados com Xantano para o estudo do comportamento sob ações cíclicas, tais como sismos, vibrações de máquinas, etc.
- iv. Modelação numérica do comportamento de solos estabilizados com biopolímeros.
- v. Comparação do comportamento com outros biopolímeros, tais como: Gelano, Ágar, Glucano.

- vi. Aplicação de solos estabilizados com Xantano a uma barragem de terra, visto que a presença do biopolímero diminui a permeabilidade.
- vii. Analisar o efeito da aplicação do biopolímeros a longo prazo e perceber o seu processo de biodegradação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ayeldeen, M. K., Negm, A. M. & Sawwaf, M. A. El., (2016). “Evaluating the physical characteristics of biopolymer/soil mixtures”. *Arab. J. Geosci*, 9:371 DOI: 10.1007/s12517-016-2366-1

ASTM D 2166 (2000). “Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil.” American Society for Testing and Material

ASTM D 2487 (1998). “Standard classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)”. American Society for Testing and Materials.

BS 1377-3 (1990) – Methods of test for soils for civil engineering purposes. 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.

Cabral, D. J. R. (2020). “Estabilização de um solo com recurso a biopolímeros: Efeito da dosagem e do tempo de cura”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra.

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, 251 <https://doi.org/10.3390/su8030251>

Chang, I.; Jeon M.; Cho, G.C. (2015). “Application of microbial biopolymers as an alternative construction binder for earth buildings in underdeveloped countries.” *International Journal of Polymer Science*, Article ID 326745 <http://dx.doi.org/10.1155/2015/326745>

Coelho, P. A. L. F. (2000). “Caracterização geotécnica de solos moles, Estudo do local experimental da Quinta da 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. (2011). “Aplicabilidade da Técnica de Deep Mixing aos Solos Moles do Baixo Mondego”. Dissertação de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra.

E 196 (1966). “Solos- Análise Granulométrica”. Especificações do LNEC, Lisboa, Portugal.

Fernandes, M. de M. (2011). *Mecânica dos Solos. Conceitos e Princípios Fundamentais*, Volume 1. (FEUP Edições)

Hataf, N., Ghadir, P. & Ranjbar, N. (2017). “Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer”. *Journal of Cleaner Production* 170 1493-1500 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.256>

Kwon, Y. M., Chang, I., Lee, M., & Cho, G. C. (2019). “Geotechnical engineering behavior of biopolymer-treated soft marine soil”. *Geomechanics and Engineering*, 17, 453–464 <https://doi.org/10.12989/gae.2019.17.5.453>

Lee, S., Chung, M., Park, H. M., Song, K. -I., & 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, 06019012 DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002909

Mendonça, A., Morais, P.V., Pires, A.C., Chung, A. P. & Oliveira, P. V. (2021). “A review on the Importance of Microbial Biopolymers Such as Xanthan Gum to Improve Soil Properties”. *Applied Sciences*, 11, 170 <https://doi.org/10.3390/app11010170>

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.

Oliveira, P. J. V. & Cabral, D. J. R. (2021). “Behaviour of sand-stabilised with xanthan gum under unconfined and confined conditions”. *Institution of Civil Engineers* <https://doi.org/10.1680/jgrim.20.00065>

Oliveira, P. J. V. & Neves, J. P. G. (2019). “Effect of Organic Matter Content in Enzymatic Biocementation Process Applied to Coarse-Grained Soils”. *American Society of Civil Engineers*. 31(7): 04019121 DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002774.

Oliveira, P. J. V., Correia, A. A. S. & Vieira, A. F. V. (2016). “Effect of organic matter in soft soils on the effectiveness of preloading for foundations”. *Institution of Civil Engineers*. 1600082 <http://dx.doi.org/10.1680/jgeen.16.00082>

Vieira, A. F. V. (2016). “Influência do teor em matéria orgânica na redução da fluência por pré-carga: análise laboratorial.” Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra.

